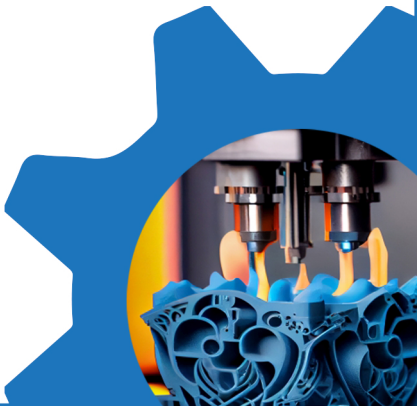


GAZI  
JOURNAL OF  
ENGINEERING  
SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN - CHIEF

**İsmail ŞAHİN**

Gazi University, Ankara, Turkey  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

**Harun GÖKÇE**

Gazi University  
e-mail: [harungokce@gazi.edu.tr](mailto:harungokce@gazi.edu.tr)

**Murat DÖRTERLER**

Gazi University  
e-mail: [dorterler@gazi.edu.tr](mailto:dorterler@gazi.edu.tr)

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

**Abdullah AKDOĞAN**

Pamukkale University

**Adem TEKEREK**

Gazi University

**Alper BÜYÜKKARAGÖZ**

Gazi University

**Amin MIRZAPOUR**

Zanjan İslami Azad University

**Ayhan AYTAÇ**

National Defense University

**Burçin ATILGAN TÜRKMEN**

Bilecik Şeyh Edebali University

**Bülent ÖZKAN**

Gazi University

**Erdem CÜCE**

Recep Tayyip Erdoğan University

**Fecir DURAN**

Gazi University

**Fatih ŞAHİN**

Gazi University

**G. Serdar TOMBUL**

ASELSAN

**Halil KARAKOÇ**

Hacettepe University

**Hüseyin GÖKÇE**

Çankırı Karatekin University

**Karolos J. KONTELEON**

Aristotle University of Thessaloniki

**M. Fatih IŞIK**

Hitit University

**M. Hanefi CALP**

Karadeniz Technical University

**M. Serkan YILDIRIM**

Gazi University

**Mustafa BOZ**

Karabük University

**Mustafa GÜNAY**

Karabük University

**Neslihan TOP**

Gazi University

**Serhat KARAP**

TUBİTAK-SAGE

**Shaik SABOOR**

Vellore Institute of Technology

**Tayfun MENLİK**

Gazi University

**Umit ATİLA**

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

**Adnan SÖZEN**

Gazi University, Turkey

**Andrew PINKERTON**

Lancaster University, England

**Majid MEGHDADI**

University of Zanjan, Iran

**Mustafa KURT**

Gazi University, Turkey

GAZİ

# JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

**Bekir Sami YILBAŞ**

King Fahd University, Sudia Arabia

**Farzollah MIRZAPOUR**

University of Zanjan, Iran

**Herbert M. REYNOLDS**

Michigan State University, USA

**Jamal KHATIB**

University of Wolverhampton, England

**John KINUTHIA**

University of South Wales, England

**Jonathan C. BORG**

University of Malta, Malta

**Hossam KISHAWY**

University of Ontario Technology, Canada

**Kürşad SEZER**

Gazi University, Turkey

**Nowruz ALLAHVERDİ**

Karatay University, Turkey

**Reza Negarastani**

RIETEX, England

**Salman NISAR**

National University of Sci. and Tech.,  
Pakistan

**Shahin JALILI**

Tebriz University, Iran

**Şakir TAŞDEMİR**

Selçuk University, Turkey

**Tahsin Tecelli ÖPÖZ**

John Moores University, England

**Yasir JOYA**

GIK Institute, Pakistan

**DİL EDİTORLERİ / LANGUAGE EDITORS**

**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram  
Veli University)

**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi  
University)

**TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR****Mert Efe CEYLAN**

e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Adem Tekerek

Ali Kalyon

Ayşenur Aslan

Burak Öztaş

Çağrı Vakkas Yıldırım

Durmuş Uygun

Elvan Hayat

Emel Akyol

Ercan Aydoğmuş

Erdem Doğan

Erhan Güneş

Ersin Daş

Esra Söğüt

Faruk Mert

Hüseyin Gökçe

Kürşat Yıldız

Mehmet Akif Erden

Mustafa Bozdemir

Mustafa Eroğlu

Mustafa Tanrıverdi

Mustafa Tanrıverdi

Neslihan Top

Nurullah Yüksel

Oğulcan Eren

Osman Kümük

Ramazan Özmen

Sakine Kıratlı

Serdar Özkaya

Serkan Savaş

Şenol Şirin

Yusuf Ziya Olpak



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

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

**CORRESPONDENCE ADDRESS :**

Gazi Akademik Yayıncılık  
Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara  
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Eklemeli İmalat için Tasarım: Kolay Montaj <i>Design for Additive Manufacturing: Easy Assembly</i> <b>Oğuz Can DOĞAN, Hüseyin Rıza BÖRKLÜ</b> .....	443-456
Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilimli Bir Eşeksenli Manyetik Dişli Tasarımı ve Analizi <i>Design and Analysis of a Coaxial Magnetic Gear with Flux Concentrate Halbach Array</i> <b>Murat KELEŞ, Cengiz BAYKASOĞLU</b> .....	457-471
Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini Üzerine Ampirik Bir Analiz: LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP <i>An Empirical Analysis of Stock Price Prediction Using Deep Learning Methods: LSTM, GRU, GAN, and WGAN-GP</i> <b>Cemal ÖZTÜRK, Abdulkadir KARACI</b> .....	472-495
Topoloji Optimizasyonu Yöntemlerinin Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Tasarımına Etkilerinin İncelenmesi <i>Investigation of the Effects of Topology Optimization Methods on Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicle Design</i> <b>Erdem GÜNEY, Gültekin UZUN</b> .....	496-521
Türkiye'de Yüksek Hızlı Tren Ağı Yapılanması için Yer Seçimi <i>Selection Place for the High-Speed Train Network Structuring in Türkiye</i> <b>Hulusi AYDEMİR, Burçin PAÇACI, Kürşat ÇUBUK</b> .....	522-531
SPH440-OD Çeliğinin MAG Kaynağı ile Birleştirilmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Kapsamında Deneysel Olarak İncelenmesi <i>Experimental Investigation of the Joining of SPH440-OD Steel with MAG Welding in the Scope of Microstructure and Mechanical Properties</i> <b>Mustafa Bayram KAYA, Muhammed ELİTAŞ</b> .....	532-546
Veri Tabanlı Tasarım Tekniği ile Voronoi Kafesli Bisiklet Sesi Tasarım Optimizasyonu <i>Voronoi Latticed Bike Saddle Design Optimization with Data-Driven Design Technique</i> <b>Ahmet DAYANÇ, Melih CANLIDİNÇ, Feridun KARAKOÇ</b> .....	547-557
Perlit, Diatomit, Zeolit ve Şamot Tuğla Harcından Alümina-Silika Esaslı Kompozit Aerojel Tozu Üretimi <i>Production of Alumina-Silica Based Composite Aerogel Powder from Perlite, Diatomite, Zeolite and Chamotte Brick Mortar</i> <b>Özge KILINÇ, Nil TOPLAN</b> .....	558-573
Öğrencilerin Akademik Performanslarını Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Değerlendiren Çalışmaların İncelenmesi <i>A Review of Studies Evaluating Students' Academic Performance with Machine Learning Techniques</i> <b>Sema KAYALI, Serkan SAVAŞ</b> .....	574-598

**GAZİ****JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES**

Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi Geliştirilmesi ve Kullanılabilirlik Analizi

*Gazi University Social Transcript Information System Development and Usability Analysis*

**Zafer AYZ.**.....599-618

Çekme Testi Numunelerinde Boyutsal Farklılıkların Çekme Dayanımına Etkisi

*Effect of Dimensional Differences on Tensile Strength in Tensile Test Specimens*

**Emre KANLI, Furkan PARMAKSIZ, Oğuz KOÇAR, Faruk MERT, Nergizhan ANAÇ.**.....619-631

İnsansız Kara Araçları İçin Derin Öğrenme Destekli Tasarım İşlem Modeli

*The Design Process Model with Deep Learning Support for Unmanned Ground Vehicles*

**Cüneyd DEMİR, Cengiz ELDEM.**.....632-644

Metamalzeme Bal Peteği Merkez Katmanlı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kompozit Plakaların Termomekanik Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi

*Investigation of Thermomechanical Material Properties of Functionally Graded Sandwich Composite Plates with Metamaterial Honeycomb Core Layer*

**Kerim Gökhan AKTAŞ** .....645-656

Nanoteknoloji Uygulamalarının Tekstil Endüstrisine Yansımaları ve Gelecek Perspektifi Üzerine Genel Bir Bakış

*An Overview of the Reflections of Nanotechnology Applications on the Textile Industry and Future Perspectives*

**Semahat DORUK, Burcu ULUTAŞ, Muhammed Bora AKIN** .....657-675

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Design for Additive Manufacturing: Easy Assembly

Oguz Can Doğan<sup>a,b</sup>, Hüseyin Rıza Börklü<sup>c</sup>

Submitted: 17.03.2024 Revised: 23.08.2024 Accepted: 07.09.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR01

### ABSTRACT

**Keywords:** Design for additive manufacturing, design for assembly, easy assembly

<sup>a,\*</sup> Gazi University,  
Graduate School of Natural and Applied  
Sciences,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3023-090X  
e mail: oguzcandogan@hotmail.com

<sup>b,\*</sup> Genstar Enerji,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06378 - Ankara, Türkiye  
e mail: oguzcandogan@hotmail.com

<sup>c</sup> Gazi University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2107-6664

\*Corresponding author:  
oguzcandogan@hotmail.com

The production of personalized, complex-shaped parts that cannot be manufactured using traditional methods is only possible with Additive Manufacturing (AM) techniques. In recent years, AM methods have been increasingly utilized in various industries, particularly in aerospace and automotive sectors. However, these methods are still in the developmental and maturation stages. Alongside modern manufacturing technologies, the Design for Additive Manufacturing (DfAM) approach can significantly reduce production and assembly times for parts. On the other hand, the Design for Assembly (DfA) approach focuses on reducing costs by simplifying the number of parts and enhancing assembly ease. By combining these methods, both assembly time and costs can be reduced. This study aims to integrate DfA and DfAM approaches to optimize the production and assembly of complex parts. DfA seeks to reduce costs by minimizing the number of parts and simplifying assembly, while DfAM enables the production of complex parts through the design freedom offered by additive manufacturing. The integration of these two approaches can make the production and assembly processes more efficient. This paper examines how DfA and DfAM approaches can be used together and the potential advantages this integration can offer for manufacturing and assembly. By applying DfA's assembly ease and DfAM's design flexibility, example designs were created. The case studies conducted demonstrated that the new designs could be simpler, with fewer parts and more cost-effective. Consequently, both manufacturing and assembly times and costs can be reduced.

## Eklemeli İmalat için Tasarım: Kolay Montaj

### ÖZ

Kişisel, karmaşık formulu ve geleneksel yöntemleri ile imalatı mümkün olmayan parçaların üretimi, ancak AM yöntemleri ile mümkündür. Son yıllarda başta havacılık ve otomotiv olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılan AM yöntemleri hala gelişme ve olgunlaşma evresindedir. Modern üretim teknolojilerine ek olarak DfAM yaklaşımı, parçaların imalat ve montaj sürelerini önemli ölçüde azaltabilir. Buna karşın DfA yaklaşımı maliyeti düşürerek parça sayısı ve montaj kolaylığına odaklanır. Bu yöntem ile hem montaj süresi hem de maliyet azalabilir. Bu çalışma, karmaşık parçaların üretim ve montajlarını optimize etmek için DfA ve DfAM yaklaşımlarını birleştirmeyi amaçlar. DfA, montajı kolaylaştırıp parça sayısını da azaltarak maliyeti düşürmeye çalışır. DfAM ise, eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü ile karmaşık parça üretimlerini mümkün kılar. Bu iki yaklaşımı bütünleştirilme, üretim ve montaj süreçlerini daha etkin kılar. Bu makalede DfA ve DfAM yaklaşımları nasıl birlikte kullanılabilir ve bunun üretim ve montaj ne tür avantajlar sağlayabileceği konuları incelenmiştir. DfA'nın montaj kolaylığını artırması ile DfAM'ın tasarım esnekliği birlikte uygulanarak örnek tasarımlar yapılmıştır. Yapılan örnek çalışmalar da yeni tasarımların daha sade / basit, az parçalı ve ekonomik olabileceğini göstermiştir. Aynı kapsamda imalat ile montaj süresi ve maliyetleri de azalabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat için tasarım, montaj için tasarım, kolay montaj

## 1. Giriş (Introduction)

Çetin rekabet koşulları altında müşteri beklentileri ve ürün çeşitleri sürekli değiştiği için piyasaya özgün, ekonomik ve kaliteli ürünler sürmek gerekir. Bu bağlamda ürün geliştirme yöntemleri de değişen koşullara uygun olmalıdır. Bir ürünün imalatı için gerekli olan tüm sınırlayıcı, özellik ve şartlar tasarım sürecinde belirlenir. Tasarım, belirli istekleri ve/veya bazı sosyal ihtiyaçları karşılamak amacı ile harcanan tüm çabalar olarak tanımlanabilir. Bu süreç; yaratıcı ve inovatif düşünme, fikir, çözüm ve konseptler geliştirme, bunları sürekli iyileştirme ve optimize etme, tasarım varyantları oluşturma, değerlendirme ve seçme, seçilen varyantları modelleme ve detaylı tasarımları yapma gibi işlemler içerebilir. Tasarım süreci makine veya elektronik gibi tek bir alan kapsayabilir ya da birçok alanın bir arada olduğu disiplinler arası bir çalışma da olabilir. Tasarım gibi imalat araştırmaları veya bu iki süreci birleştirme / bütünleştirme amaçlı çalışmalar da son 30-40 yılda oldukça yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda; CAD / CAM (Bilgisayar Destekli Tasarım / Bilgisayar Destekli İmalat) entegrasyonu veya CIM (Bilgisayar Bütünleşik İmalat) gibi yaklaşımlar yanında eşzamanlı mühendislik, unsur tabanlı tasarım x için tasarım vb. yöntemler benimsenmiştir [1]. Böylece üretimde maliyeti düşürmek, kalite ve dayanımı artırmak ve süreci azaltmak amaçlı önemli çabalar harcanmıştır. Yapılan bu çalışmalar kapsamında; montaj için tasarım, üretim için tasarım, kalite için tasarım gibi birçok yeni konu veya uzmanlık alanı doğmuştur. Montaj için tasarım veya kolay monte edilecek tasarım, parça veya sistemleri kolay birleştirilebilecek şekilde tasarlamayı amaçlar. Yani bu kapsamda; parça sayısını azaltma, parçaları kolay takma, ayarlama ve sabitleme gibi hususlar dikkate alınır. Böylece üretim süreci kolaylaşacağı ve hızlanacağı gibi maliyet de düşecektir [1,2].

Pahalı ürünlerde maliyeti düşürmek için farklı kaynaklardan alınan unsurları aynı şekil ve koşullarda bir araya getirerek montaj işlemi tamamlanır. Ayrıca hem elle yapılacak hem de otomatik montaj maliyetini azaltmada kaliteli ürün tasarımı çok önemlidir. Bu nedenle bir makine, aparat veya cihaz tasarımı yapılırken montaja uygun tasarım olmasına dikkat edilmelidir [3]. Yani, parça sayısını azaltılma ve basitleştirmeye, parçaların kolay / çabuk takılması ve ayarlanmasına, ekonomik (ucuz) olmalarına ve sistemin kolay kullanılabilmesi vb. hususlara dikkat edilmelidir.

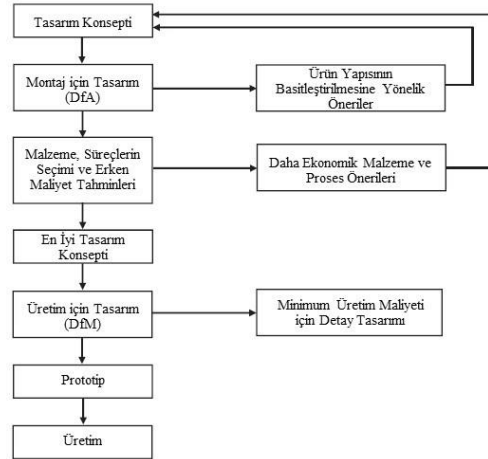
Eklemeli imalat teknolojileri, son 30 yılda oldukça popüler bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Burada malzeme ekleyerek parçaları katman katman üretmek için 3B bilgisayar destekli tasarım modelleri kullanılır. Böylece, geleneksel yöntemler ile imali zor karmaşık geometri parçaların üretilmesi mümkün olur. Özelleştirilmiş tasarımların ve prototiplerin kolayca üretilmesine izin verir. Malzeme israfını önleme, üretim ve montaj zorluklarını aşmak için eklemeli imalat için tasarım veya kolay montaj için tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşım; tasarımı inceleme, gereksiz parça sayısı veya parça özelliklerini azaltma (tasarımı basitleştirme), montajın daha kolay yapılması ve maliyetini düşürmeyi amaçlar. Bu bağlamda tasarımcı, tasarıma başlamadan önce monte edilebilirlik durumunu değerlendirerek montaj verimliliğini artırmaya çalışmalıdır [3]. Son yıllarda DfAM alanında yapılan araştırmalardaki hızlı artış, teknolojinin gelişimi ve endüstriyel uygulamalardaki önemi açısından dikkat çekicidir. Geleneksel imalat tekniklerine göre sahip olduğu avantajlar nedeniyle dördüncü sanayi devrimini başlatan teknolojilerden biri olarak görülmektedir [4-5]. Literatürde DfAM ile ilgili birçok akademik çalışma bulunmaktadır. Doğan ve Kamer'in çalışmasında, endüstride yaygın olarak kullanılan dişli çarkların ağırlığını azaltmak amacıyla eklemeli imalat yöntemi ve topoloji optimizasyona dayalı yeni bir yaklaşım tanıtılmaktadır [6]. Alfiy ve diğerleri (vd.), son yıllarda AM teknolojisindeki gelişmeleri incelemişlerdir [7]. Kasar, ekonomik çift sırtlı horn anten tasarımı ve üretiminde AM yöntemi kullanımını incelemiştir [8]. Kaya vd., AM yöntemini kullanarak esnek mekanizma tasarım ve testini ele almışlardır. Böylece parça sayısını azaltma ve sürtünmeyi gidermeye çalışmışlardır [9]. Şanlıer vd., geleneksel ve yeni imalat yöntemlerini karşılaştırmak için dizüstü bilgisayar sehpa tasarımını ele almışlardır [10]. Top vd., eklemeli imalat ve topoloji optimizasyonu dayalı el freni mekanizma tasarımı yapmışlardır [11]. Artık havacılık sektöründe de DfAM yöntemi çok kullanılmaktadır. Bu kapsamda Aydın, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının havacılıktaki uygulamaları üzerine bir derleme sunmaktadır [12]. Bir diğer çalışma ise, Kayacan vd. havacılıktaki eklemeli imalat için uyarlanabilir topoloji optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır [13].

Literatür incelemeleri eklemeli imalat teknolojisinin her geçen gün birçok sektörde daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Otomotiv sektöründen havacılığa, tıptan savunma sanayisine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu araştırmalar eklemeli imalatın tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, karmaşık geometrilerin üretimi ve tedarik zinciri yönetimi gibi avantajlarını ortaya koymaktadır. Ek olarak malzeme çeşitliliği, enerji verimliliği ve malzeme tasarrufu gibi ekonomik ve

çevresel faydalar da literatürde ön plana çıkmaktadır. Ancak bazı çalışmalar eklemeli imalatın yüzey kalitesi, malzeme dayanıklılığı ve üretim hızı gibi olumsuz yanlarına değinerek bunların iyileştirilmesi gerektiğini önermektedir. Ayrıca, eklemeli imalatın gelecek potansiyeli ve endüstri için önemi de sürekli belirtilmektedir. Ancak, DfAM ile kolay montaj amaçlı tasarımcı çalışmaları kapsamlı yeterli akademik çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu araştırma kapsamında ise, eklemeli imalat ile yapılacak parça / sistemlerin kolay montajı için yöntem, süreç ve ilkeleri incelenecektir. Eklemeli imalat için tasarım alanındaki mevcut çalışmalar gözden geçirdikten sonra bu tür parçaların kolay montajını gösteren örnek uygulamalar yapılacaktır.

## 2. Montaj için Tasarım Yaklaşımı (Design for Assembly Approach)

Bir sisteme ait çeşitli parçaları belirli bir sıra ve düzen içinde birleştirmeye montaj denir. DfA alanında birçok akademik ve ticari araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan bu araştırmalar daha ekonomik, kaliteli ve hızlı imalat yapmayı hedefler. Bir ürüne ait üretim maliyetinin (imalat, montaj, test vb.) yaklaşık %70'i tasarım sürecinde belirlenir [1-3]. Bu bağlamda montajda kolaylık sağla için ilk akademik çalışmalar 1960'lı yıllarda yapılmıştır. Bu kapsamda sistemi oluşturan parça sayısını azaltmak ve daha basit geometrik biçimlere sahip olmaları fikri benimsenmiştir [2]. Ayrıca, parçaların daha kolay ve hızlı imal edilmeleri, montaj sırası veya planının daha çabuk anlaşılması (basit olması), parçaların takılması / ayarlanması / sabitlenmesi gibi işlemlerin daha basit olması ve gerektiğinde demontaj ve bakım işlemlerinin de kolayca yapılabilmesi düşünülmüştür. Bu amaçlı birçok akademik ve endüstriyel araştırmalar yapılmıştır [14,15]. 1970'li yıllara kadar bu tür tasarımlar için sayısal yöntemler geliştirilmemiştir. Bu konuda Hitachi firması "Montaj Değerlendirme Metodu (Assembly Evaluation Method - AEM)" adlı öncü bir çalışma yapmıştır. Burada "Bir Parça Bir Hareket" yaklaşımı esas alınmıştır. Yani, montaj işlemlerine ait her bir adımı ve parça hareketleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Daha sonra Geoffrey Boothroyd, parçaların montaj süre ve maliyetlerini ön görebilmek için "Montaj için Tasarım" metodolojisi geliştirmiştir. Burada tasarım sürecinde montaja daha fazla önem ve dikkat gösterilerek üretim esnasında zaman ve maliyette tasarruf sağlanmaya çalışılır [15]. Bu çalışmalar sonucu Amerikan Bilim Vakfı (U.S. NSF National Science Foundation) DfA ve imalat için tasarım (DfM) konulu araştırmalara destek vermiştir. Böylece tasarım ve üretim süreçlerini daha verimli yapılması amaçlanmıştır [2]. Boothroyd, DfA'a önem ve öncelik verilmesi ile ürünün sade ve basit yapılabileceğini belirtmiş ve süreci de Şekil 1'de gibi adımlara ayırmıştır [16].

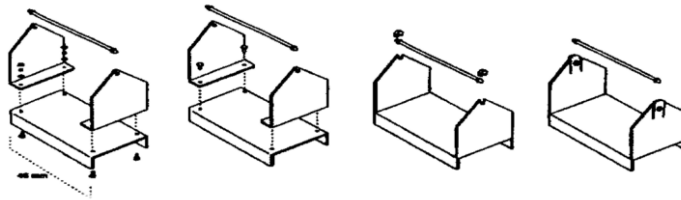


Şekil 1. Üretim ve Montaj için Tasarım (DfMA) işleminin aşamaları [17]  
(Typical stages in a DfMA procedure)

### 2.1. DfA prensipleri (DfA principles)

DfA yöntemine ait genel ve temel bazı ilkeleri vardır. Bu ilkeler, tasarımlarda parça sayısını azaltmak ve montaj işçilik sürelerini kısaltmaya çalışır. Ayrıca, parçaları tutma, taşıma, yönlendirme ve yerleştirme işlemlerini kolaylaştırmada montaj işçilik süresini de azaltacaktır. Tüm bu işlemlerin düzgün bir şekilde yapılması, montaj için tasarım ile sağlanacak maliyet tasarrufunu da artıracaktır. Bu yaklaşımı iyi şekilde uygulamak için dikkate alınması gereken ilkeler şunlardır [2]:

- Parça sayısının azaltılması
- Parça çeşitliliğinin azaltılması
- Birleştirici sayısının azaltılması
- Parçaların kolay yerleştirilmesi ve yönlendirilmesi
- Montaj yerinin tam görünür olması
- Parçaların kolay tutulabilir olması
- Yeniden yönlendirmenin önlenmesi
- Parçaların yanlış monte edilmeyecek şekilde tasarlanması
- Tam simetrik parçalar veya görsel asimetrinin sağlanması
- Parçaların modül olarak tasarlanması
- Şekil olarak benzer parçalarda farklı renk kullanımı
- Yerçekimine uygun montaj sıralaması



Şekil 2. Parça sayısının azaltılmasına ait örnek bir tasarım çalışması [2]  
(An example design study of reducing the number of parts)

Bu süreçte montajda bulunan parça adeti düşürerek üretimde ve montaj hattında kolaylık amaçlanır. Boothroyd, montajı ürün adetine bağlı olarak üçe ayırır. Bunlar; manuel (elle) montaj, yüksek hızlı otomatik montaj, robotla yapılan montaj şeklindedir. Bu yöntemlere göre daha iyi ürünler tasarlanmış ve monte edilecek parça sayıları azaltılmaya çalışılmıştır. Böylece hem montaj hattında kolaylık sağlamaya hem de maliyetleri düşürmeye çalışılmıştır [18]. DfA yöntemi uygulanırken oluşabilecek sorunları azaltmak, kaliteyi yükseltmek ve etkin üretim ekipmanları kullanımı ile maliyetler azaltılabilir. Genelde DfA, tasarım esnasında alt parçalarda ihtiyaç duyulan analiz durumunu erken tasarım aşamalarında göz önünde bulundurur. DfA yöntemi günümüzde birçok firma tarafından kullanılmaktadır. Örneğin, General Electric'e ait 1960 yılında yayınlanan "İmal Edilebilirlik" adlı kitapta bu firmanın DfA kurallarını ürün geliştirme sürecinde uyguladığı görülmektedir. 1970 sonrası ise bu konu ile ilgili başka bazı kitap ve makaleler yayınlamaya başlamıştır. Bunlardan en önemlisi Boothroyd'un montaj için tasarım ve endüstriyel uygulaması gösterilebilir. Ürün tasarım aşamasında; montaj yöntemi, parça toleransları, talaşlı imalat türleri gibi imalat maliyeti ve toplam maliyeti önemli ölçüde etkileyen kararlar alınır. DfA, montaj zorluklarını azaltma ve maliyeti düşürmeyi sağlayan bir iyileştirme yöntemidir. Bu teknikte, parça sayısının azaltılması ve bunların kolay birleştirilmesi ile maliyet önemli oranda azalacaktır [19]. DfA metodolojisinde uyulması gereken başlıca kriterler şunlardır [20]:

- Parça adeti olabildiğince az olan ürün tasarlanmalı
- Ayrı bağlantı elemanlarından kaçınılmalı
- Montaj yönleri azaltılmalı
- Parça uyumu artırılmalı, montajı kolaylaştıracak tasarım yapılmalı ve
- Parça üzerindeki işlem sayısı azaltılmalıdır.

Bu kriterlere bağlı olarak ürünün montaj maliyetinde önemi oranda azalma sağlanabilir.

1993'te Amerikan Douglas Ticari Hava Araçları maliyetlerinin fazla olduğu düşünülmüştür. Bu konuda yapılan araştırmalar sonucu DfMA uygulamaya karar verilmiş ve ilişkili çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonrası yaklaşık 300 yolcu kapasiteli uçak modeli MD-11'in klima sistemi hava giriş kanal tasarımında değişiklik yapılmıştır. Önceki tasarım yıllarca DC-10 uçağında kullanılmış olup toplam 2.172 adet parçadan oluşmuş ve bu parçaların montaj sonrası ayarlanması gerekmiştir. Bu hava kanalı tasarımındaki değişiklik uygulanan tekniklerle basitleştirilmesi iki hafta kadar sürmüştür. Çalışmalar sonucu yeni tasarım toplam 1.383 parça içermiştir. Ünite montajı önceden 4.038 işlem iken bu sayı 2.649'ye düşmüş ve toplam ağırlık da yaklaşık 40 kg kadar azalmıştır. Aşınması olası parça sayısı azalan yeni ünite daha güvenli ve kolay bakım yapılabilir olmuştur [21-22]. McDonnell Douglas MD-11 Amerikan yolcu uçağına ait resim Şekil 3'te gösterilmiştir.





Şekil 3. McDonnell Douglas MD-11 Amerikan yolcu uçağı [22]  
(McDonnell Douglas MD-11 American passenger plane)

### 3. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing)

CAD / CAM'ı birleştirme / bütünleştirme sağlayan AM alanında 1980'li yıllardan itibaren önemli araştırmalar yapılmış ve bunların bir kısmı da ticari ürünlere dönüşmüştür. Burada, talaş kaldırma şeklindeki diğer imalat yöntemlerinden farklı olarak, katman katman malzeme eklenmesi veya yığılması ile parçalar imal edilir. Malzeme yığma şekilleri ise plastik ergitme, toz yayma veya püskürtme, kâğıt gibi ince tabakalar yayma gibi olabilmektedir. Önce model şeklinde imal edilen parçalar zamanla metal malzemelerden gerçek işlevsel parçalar şekline de dönüşmüştür. AM yöntemi ile tasarımcı üretilebilirlik durumunu düşünmeden modelini istediği gibi geliştirebilir [23].

AM 3B bilgisayar verileri kullanılarak parçaların katman katman üretimini sağlayan yeni bir imalat tekniğidir. Bu yöntem ile imalat zaman alıcı olmakla birlikte zor parçalar kolayca üretilebilir. AM; CAD modelleri, tersine mühendislik uygulamaları, bilgisayarlı tomografi gibi farklı 3B katı model verileri kullanılabilir. 3B model ince katmanlara bölünür ve ardışık olarak bunlar imalat bitene kadar kullanılır. AM yöntemlerinin bazı avantajları bulunmaktadır. Örneğin geleneksel üretim yöntemlerinde, parça imalatı talaş kaldırmaya dayandığı için büyük miktarda malzeme israfı olabilir. Buna karşın AM yöntemleri sadece gerekli miktarda malzeme kullanarak tasarruf sağlar. Ayrıca, AM süreçlerinde geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan master, iş kalıbı ve soğutucu gibi yardımcı araçlara ihtiyaç duyulmaz. Böylece gereksiz birçok iş / işlem ortadan kalkar. AM yöntemleri karmaşık geometriye sahip parçaların üretimini de sağlar. Örneğin, parça bir ucu esnek özellikte iken diğer ucu rijit olacak şekilde üretilebilir [23].

#### 3.1. AM yöntemleri (AM methods)

Son 10 yılda eklemeli imalat dental implantlardan motor parçalarına kadar geniş bir alanda uygulanmaya başlanmıştır. Sadece prototipler değil fonksiyonel gerçek parçalar da üretilebilmektedir. Son yıllarda 3B yazıcı maliyetlerinin düşmesi ve büyük rağbet görmeleri nedeniyle bu cihazlar çok yaygınlaşmıştır. Bunların kullanımı, endüstri tesisleri ve araştırma enstitülerle sınırlı olmayıp ev ve ofislerde bireysel kullanıcılar tarafından da tercih edilir olmuşlardır. Masaüstü 3B yazıcılar, evler veya hobi atölyelerinde de artık çok kullanılmaktadır [24]. AM amaçlı birçok farklı yöntem bulunmakta olup bunların genel bir sınıflandırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Bu yöntemler kullanım şekillerine göre sınıflandırılabilir. Örneğin FDM yöntemi, diğer yöntemlere göre daha ekonomik olan masaüstü yazıcılar için tercih edilmektedir. Plastik filament bir ekstrüder yardımıyla ısıtılmış bir nozuldan geçirilerek yarı eriyik halde katman katman yığılmasıyla model oluşturulur. SLS'de, metal tozu ve lazer ışığını kullanarak bir yapı elde edilir. Burada metal tozu sinterlenir ve böylece parça hazır hale gelir. Stereolitografi ise fotopolimer reçine, fotokimyasal ve lazer teknolojileri birlikte kullanarak parça üretir [26].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri [5,25] (Additive manufacturing methods)

Teknoloji	Tip	Yöntem	Kategori	Malzeme	Güç Kaynağı
FDM	Sıvı	Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik	Termoplastik	Termal Enerji
SL (SLA)	Sıvı	Fotopolimerizasyon	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Seramik	UV Işını
DLP	Sıvı	Fotopolimerizasyon	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Seramik	Projeksiyon
PJ	Sıvı	Malzeme Püskürtme	Polimerize edilebilir	Fotopolimer, Wax	UV Işını
LOM	Katı	Sac Laminasyon	Yapışık Objeler	Fotopolimer, Wax	Lazer Işını
SLS	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Poliamid, Polimer	Güçlü Lazer Işını
DMSL	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Güçlü Lazer Işını
SLM	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Güçlü Lazer Işını
EBM	Toz	Toz Yataklı Eritme	Eritme	Metal Tozu, Seramik Tozu	Elektron Işını
LENS	Toz	Direk Enerji Depolama	Eritme	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
EBAM	Toz	Direk Enerji Depolama	Eritme	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
BJ	Toz	Yapıştırıcı Püskürtme	Yapıştırma	Seramik Tozu, Metal Tozu, Kum	Termal Enerji

Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS) ve Seçmeli Lazer Ergitme (SLE) en çok kullanılan AM yöntemleridir. Bu yöntemler genelde metal parçaların AM ile üretimi sırasında kullanılırlar. SLS ve SLE tekniklerinde, toz halinde bulunan hammadde ince bir tabaka şeklinde yayılarak istenen bölgeler lazer ışını yardımıyla taranır. Işın gelen yerlerde sıcaklıkla birlikte toz malzeme eriyerek veya sinterlenerek ortamda bulunan diğer toz tanelerle kaynaşır. Her işlem sonunda platform, z ekseninde bir katman kalınlığı alçalır. Her katman için bu işlemler tekrarlanır. Bu süreçte serbest halde bulunup destek görevi gören serbest tozlar, fırça veya vakumlu emici yardımıyla temizlenerek elde edilen parça alınır [27].

### 3.2. AM işlemi veri akışı (AM process data flow)

Üretimi istenen ve 3B çizimi tamamlanan model genelde doğrudan imalat makinelerine gönderilir. 3B katı model öncelikle STL adlı formata çevrilir. Hata durumu incelenir ve varsa giderilir. Tablaya uygun yerleşim yapıldıktan sonra inşa edilecek yön seçilip ihtiyaca göre destek parçaları ile ön hazırlık yapılır. Ön hazırlık sonrası 3B katı model 2B katman katman dilimleme işlemi yapılarak üretime hazır hal getirilir ve imalat makinesine gönderilir. Bu şekilde üretim yapılabileceği gibi STL formatına çevrilmeden dilimleme işlemi yapılarak da imalat makinesine gönderilebilir (Şekil 4). İmalat makinesi, dilimlenmiş 2B verileri alarak katman katman üretimi gerçekleştirir [25].



Şekil 4. Eklemeli imalat işlemi veri akışı [25]  
(Additive manufacturing process data flow)

### 3.3. Eklemeli imalat için tasarım (Design for additive manufacturing)

Son yıllarda AM gibi yeni teknolojiler bariz bir şekilde gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bu teknolojiler, çeşitli avantajların yanı sıra destek yapıları ve son işleme gereksinimleri gibi bazı kısıtlamalar da içerir. AM'den daha iyi faydalanabilmek için ürün tasarımı bu yöntemin özellik ve şartlara uygun olmalıdır. Ayrıca burada birden fazla malzeme kullanımı, tasarım özgürlüğü ve esnekliği de olabilir. Tüm bu özellikleri ile AM bir üretim tekniği olması ötesinde tasarım sürecine ait yeni yaklaşımları da gerekli kılmıştır. Bu bağlamda DfAM yaklaşımı geliştirilmiştir [28,29]. DfAM; AM ile yapılacak parçaların daha



kolay, hızlı ve ekonomik üretilmesi ve monte edilmesine katkı ve kolaylık sağlar [30].

DfAM, daha önceden mevcut ve genel imalatta montajı kolaylaştıran DfM yaklaşımına ve bu özel alana uyarlanmasına dayanır. DfAM, AM kapsamlı tasarım ve üretim önemli bir yöntemdir. AM'ye ait üretim kısıtlamaları, diğer üretim teknolojisine göre daha esnekliklerdir. Böylece burada daha karmaşık ve üretimi zor parçalar kolayca üretilir [31]. Bu yöntem; şekil, boyut, geometrik mezo-yapı, çoklu malzeme ve mikro yapı sentezinde üretimi mümkün kılar. Ayrıca, mevcut bileşenleri yeniden değerlendirme, geliştirme ve tekrar tasarlama fırsatları da sunar [32].

Genel olarak, AM yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Tablo 2. AM yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [33] (Advantages and disadvantages of AM methods)

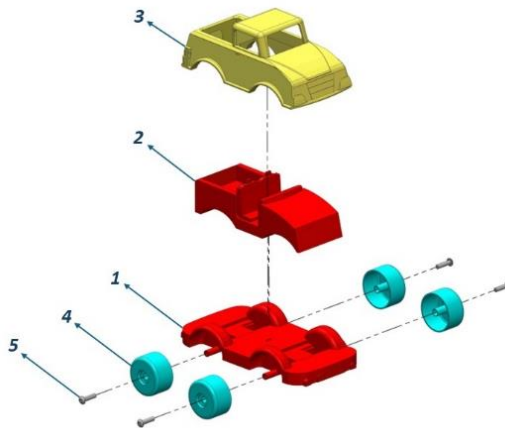
AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
AM teknolojileri üretim aşamasında özel master/kalıp benzeri aletler gerektirmediği için kalıp tasarımı ve üretim faaliyetlerinden işçilik ve maliyet tasarrufu sağlar.	AM için kullanılan malzeme maliyetleri yüksektir.
AM yöntemi ile karmaşık geometriye sahip kritik parçaların metal tozu malzeme ile üretilmesi mümkündür.	AM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri kullanılan malzemeden farklı olabilir.
Gözenekli hafif parçaların AM yöntemi dışında başka bir yöntemle üretilmesi zordur. Bu tür hafif gözenekli parçalar AM ile kolayca üretilir.	Yüksek tüketim (gaz, toz malzeme, yakıt vb.) giderleri vardır.
Tamir, bakım ve onarım faaliyetlerinde AM teknolojileri kullanılarak hızlı yedek parça imalatı yapılabilir.	AM makinaları yüksek yatırım bütçe ve maliyetleri gerektirir.
Biyomimetik (doğa taklidi) ile ortaya çıkan tasarım kolaylığı çok ileri teknolojiler için uygundur.	Bunlar yavaş işlem ve düşük yapı hacmi nedeniyle seri üretime uygun değildir.
AM ile ticari havacılık işletmelerinde atmosfere salınan karbondioksit miktarında azalma sağlanabilir.	CNC tezgahlara göre imalat maliyeti (hammadde, ekipman, gaz vb.) daha yüksektir.
AM teknolojileri artık malzeme miktarı ve malzeme israfına katkı sağlayabilir.	AM sürecinde mikro gözenekler ve kılcal çatlaklar oluşabilir.
Ayrıca hafif olması nedeniyle birçok sistemin yakıt tüketimi azalacaktır.	Üretilen parçalar üzerinde son işleme (ısıl işlem, polisaj vb.) gerekebilir.

#### 4. Materyal ve Method (Materials and Methods)

Bu kısımda daha önceden teorik olarak değinilen hususlar bazı somut örnekler üzerine ele alınacaktır. Bu kapsamda mevcut bazı örnek ürünler daha kolay imalat ve montaj açısından tekrar tasarlanacak ve parça sayıları azaltılarak daha basit hale getirilmeye çalışılacaktır. Böylece bu yeni tasarımların daha hızlı ve ekonomik üretimi mümkün olabilecektir.

##### 4.1. Oyuncak araba örneği (Toy car example)

Bir oyuncak arabaya ait eski bir tasarım (ayrıştırılmış halde) Şekil 5'te gösterilmiştir. Plastik enjeksiyon ile üretilen bu ürün 11 parçadan oluşmaktadır. DfA ve DfAM yöntem ve kurallarına göre yapılan yeni tasarım montaj ve üretimin daha kolay, hızlı ve güvenilir olmasını sağlar. Böylece üretim ve dolayısı ile ürün maliyeti de oldukça azalacaktır. Bu ürünün eski tasarımında kullanılan parça kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 3'te verilmiştir.

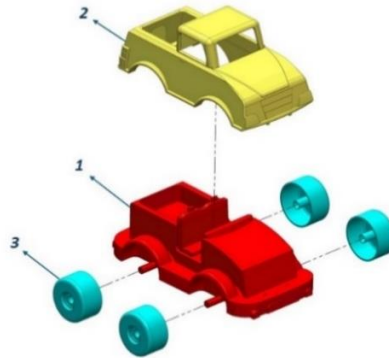


Şekil 5. Oyuncak arabaya ait eski tasarımın ayrıştırılmış gösterimi (Deconstructed representation of the old design of a toy car)

Tablo 3. Oyuncak araba eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a toy car)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	OA-E-0000-0001	Şasi	Plastik	1
2	OA-E-0000-0002	Araba iç kısmı	Plastik	1
3	OA-E-0000-0003	Kaporta	Plastik	1
4	OA-E-0000-0004	Teker	Plastik	4
5	ISO 7380	Bombe başlı imbus civata	Hazır	4

DfA ve DfAM ilkeleri uygulanan oyuncak araba montajı, 11 parçadan 6 parçaya düştüğü görülmektedir. Öncelikle ayrı parçalar olan araba iç kısmı parçası ile şasi parçası birleştirilmiştir. Bu parçanın üst şasi ile montajı gerçekleşmesi için iki tane ön ve arkaya tırnaklar eklenmiştir. Böylece önceden plastik kaynak ile montajı yapılmış ürün yeni tasarımla birlikte montajı daha kolay ve ekonomik bir yöntemle gerçekleştirilmiş olacaktır. Sonrasında 4 adet kullanılan bombe başlı imbus civata yerine, tekerlerin monte edilebileceği bir şasi tasarımı yapılmıştır. Daha sonra ise, montaj sürecinde zorluk olmaması için keskin tüm kenarlar kavisli ve yumuşak bir hale getirilmiştir. Oyuncak arabanın eski tasarımında ürün plastik enjeksiyon ile üretilmektedir. Plastik enjeksiyon ile imalat olumlu olduğu kadar mahzurlu yanlar da içerebilir. Üretimi gerçekleştirmek için malzeme hazırlığı, kalıp tasarımı, enjeksiyon, soğutma, açma ve ayırma, bazı durumlarda da ikincil işlemler (kesme, delme, montaj vb. işlemler) gibi hazırlık aşamalarından geçmektedir. Yeni tasarımda geleneksel üretim yöntemleri yerine daha kolay ve hızlı üretim yapılabilmesi için eklemeli imalat yöntemlerine uygun tasarım tercih edilmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı ise, üretim miktarı, tasarım karmaşıklığı, bütçe ve süreç ihtiyaçlarına göre değişebilmektedir. Burada özellikle prototipler veya küçük seri üretimler için uygun olup günümüzde de çok yaygın olan eklemeli imalat yöntemlerinden FDM yöntemi tercih edilmiştir. Kolay montaj için yeniden tasarlanan ürün Şekil 6'da gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 6. Oyuncak arabaya ait yeni tasarımın ayrıştırılmış gösterimi (Decomposed representation of the new design of a toy car)

Tablo 4. Oyuncak arabaya ait yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the new design a toy car)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	OA-E-0000-0001	Şasi ve iç kısım	Plastik	1
2	OA-E-0000-0002	Kaporta	Plastik	1
3	OA-E-0000-0003	Teker	Plastik	4

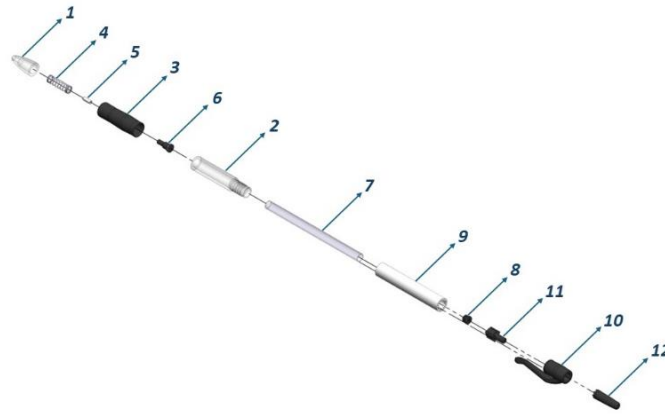
İki tasarımı karşılaştırdığımızda, Tablo 5'te görüldüğü gibi oyuncak araba ürünü montajı 11 parçadan 6 parçaya düşmüştür. Eski tasarımda geleneksel üretim yöntemi olan plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilirken, yeni tasarımda eklemeli imalat yöntemi olan FDM ile üretilmiştir. Ancak daha da önemlisi iki tasarım arasındaki toplam montaj zaman farkı, parçaların daha kolay montaj edilebildiğini göstermektedir. Burada DfAM, kişiselleştirme, karmaşık geometri, ekonomik prototipleme, malzeme verimliliği ve hızlı üretim gibi avantajlar sunar. Bu yaklaşım, yüksek özelleştirme ve fonksiyonel tasarımlar sağlar, atıkları azaltır ve pazara hızlı bir şekilde yeni ürünler sunma imkânı sunar. AM yöntemleri, karmaşık ve yenilikçi tasarımların hızlı ve ekonomik bir şekilde üretilmesini sağlar. Ayrıca, tasarıma ait estetik ve işlevsellik de kolayca artırılabilir. Bu amaçla karmaşık geometri ve özel (kişisel) unsurlar dikkate alınmaya ve birleştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, geometrik biçim ve malzeme kullanımı optimize edilmeye ve üretim maliyeti de azaltılmaya gayret edilmiştir. Burada ele alınan oyuncak araba tasarımında (DfAM kuralları kullanılarak); kompakt (küçük), sade (basit) az parçalı ve kolay monte edilebilecek bir tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5. Oyuncak araba ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması  
(A comparison of old and new designs for toy car assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
Eski Tasarım	11	7-10	Plastik enjeksiyon
Yeni Tasarım	6	2-3	FDM

#### 4.2. Pilot kalem örneği (Pilot pen example)

Bir pilot kalem ürününün eski tasarımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen pilot kalem toplam 12 adet parçadan oluşmaktadır. Montaj sürecindeki zorlukları en aza indirmek, üretimi kolaylaştırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla DfA ve DfAM yöntemleri kullanılarak yeni bir tasarım yapılmıştır. Pilot kaleme ait eski tasarımda kullanılan parçaların kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 6'da verilmiştir.

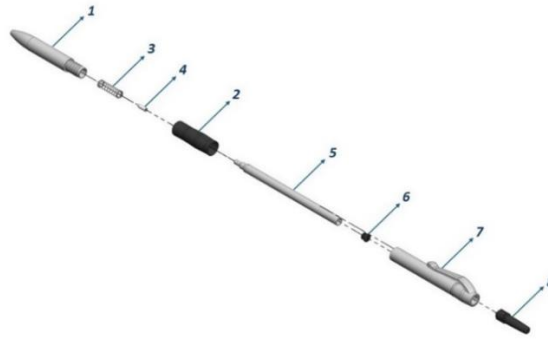


Şekil 7. Pilot kaleme ait eski tasarımın ayrıştırılmış gösterimi  
(Deconstructed representation of the old design of a pilot pen)

Tablo 6. Pilot kalem ürünü eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a pilot pen)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-E-0000-0001	Uç başlık	Plastik	1
2	PK-E-0000-0002	Alt gövde	Plastik	1
3	PK-E-0000-0003	Tutma kısmı	Kauçuk	1
4	PK-E-0000-0004	Yay	Çelik	1
5	PK-E-0000-0005	Bilye	Çelik	1
6	PK-E-0000-0006	Bilye kapak	Plastik	1
7	PK-E-0000-0007	Mürekkep gövde	Plastik	1
8	PK-E-0000-0008	Üst kapak	Plastik	1
9	PK-E-0000-0009	Üst gövde	Plastik	1
10	PK-E-0000-0010	Başlık	Plastik	1
11	PK-E-0000-0011	Kastanyola	Plastik	1
12	PK-E-0000-0012	İtici kapak	Plastik	1

DfA ve DfAM ilkeleri uygulanan pilot kalem ürünü montajı, 12 parçadan 8 parçaya indirilmiştir. Bu sadeleştirme aşamasında, gereksiz parçalar yeniden tasarlanmış ve aynı işlevi yerine getirecek şekilde düzenlenmiştir. Diğer tüm parçalar, işlevsel parçaları doğru konumda tutmak için gereklidir. Şekil 8'de gösterildiği gibi kolay montaj açısından, uç başlık parçası ile alt gövde parçası birleşiminden, uç başlık gövde isminde yeni bir tasarım eklenmiştir. Sonrasında bilye kapak parçası ile mürekkep gövde parçası birleştirilerek yeni tasarımda gövde ismini almıştır. Daha sonrasında ise, üst gövde ile başlık parçaları birleştirilerek başlık gövde ismiyle yeni bir parça tasarlanmıştır. En son olarak da kastanyola ve itici kapak parçaları birleştirilerek yeni bir parça tasarımı yapılmıştır. Böylece tasarımdaki gereksiz parçalar azaltılmış montajda kolaylık sağlanmıştır. Pilot kalemin tutma aparatı kauçuk malzemesinden, yay ile bilye çelik malzemedenden, geriye kalan diğer parçalar ise plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilmektedir. Yeni tasarımda, geleneksel üretim yöntemleri yerine eklemeli imalat yöntemlerine uygun bir tasarım yapılmış ve bu sayede üretim sürecinin daha kolay ve hızlı olması amaçlanmıştır. Özellikle prototipler veya küçük seri üretimler için uygun olan ve günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan AM yöntemlerinden biri olan FDM yöntemi, tercih edilen üretim yöntemi olmuştur. Tasarımı tamamlanan yeni ürün Şekil 8'de gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 8. Pilot kalem ürününe ait yeni tasarımın ayrıştırılmış gösterimi  
(Decomposed representation of the new design of a pilot pen)

Tablo 7. Pilot kalem ürünü yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the new design of a pilot pen)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-Y-0000-0001	Uç başlık gövdesi	Plastik	1
2	PK-Y-0000-0002	Tutma kısmı	Kauçuk	1
3	PK-Y-0000-0003	Yay	Çelik	1
4	PK-Y-0000-0004	Bilye	Çelik	1
5	PK-Y-0000-0005	Gövde	Plastik	1
6	PK-Y-0000-0006	Üst kapak	Plastik	1
7	PK-Y-0000-0007	Başlık kısmı	Plastik	1
8	PK-Y-0000-0008	İtici kapak	Plastik	1

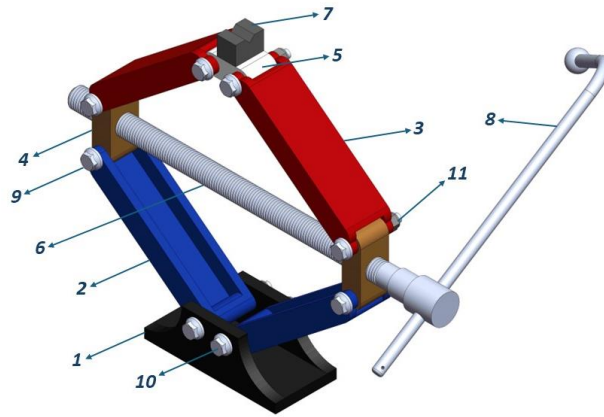
Başarılı bir tasarım sürecinde minimum parça sayısına odaklanarak sistemdeki parçaların besleme ve montaj açısından potansiyel sorunları göz önüne alınmalıdır. Özellikle manuel montaj durumunda, kavrama, manipülasyon ve benzeri işlemlerle ilgili sorular sıkça değerlendirilmelidir. Pilot kalem ürününe ait eski ve yeni tasarımlar mukayese edildiğinde, Tablo 8’de görüldüğü gibi eski tasarımda 12 parçadan oluşan ürün, yeni tasarımda 8 parçaya düşmüştür. Kolay montaj için tasarım ilkelerinin burada en önemli yönlerinden biri, minimum sayıda montaj edilebilecek parça kullanımı ilkesini uygulamaktır. Eski tasarımda parçalar plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilirken, yeni tasarımda AM yöntemi FDM ile üretilmiştir. Böylece üretim süresi kısalmış olup zaman ve maliyet tasarrufu ile parçalar daha kolay monte edilebilmiştir. Burada DfAM özelleştirilmiş tasarımlar, ergonomik detaylar ve karmaşık geometrilere izin verir. Ayrıca, entegre fonksiyonel parçalar ve hafif ama dayanıklı yapılar da mümkün olabilir. Ek olarak ekonomik prototip oluşturma ve hızlı üretim de yapılabilir. Böylece kalemin performansı ve estetiği kolay ve çabuk bir şekilde iyileştirilebilir. Ayrıca, malzeme verimliliği ve atık azaltma sayesinde sürdürülebilir üretim elde edilir. Tüm bu husus ve avantajlar göstermektedir ki DfAM yaklaşımı ile daha iyi, ekonomik ve optimum sistemler tasarlanabilir ve üretilebilir.

Tablo 8. Pilot kalem ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması  
(A comparison of old and new designs for pilot pen assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
<b>Eski Tasarım</b>	12	5-7	Plastik Enjeksiyon
<b>Yeni Tasarım</b>	8	3-5	FDM

#### 4.3. Kriko ürün örneği (Jack product example)

Şekil 9’da bir kriko montajına ait eski tasarımı gösterilmiştir. Sistematik bir yaklaşımın benimsendiği parça tasarımında, bazı bileşenlerin montaj sorunlarını önceden engellemek amacıyla tasarım değişiklikleri önermek, parçanın montaj ve demontaj işlem hatalarını minimuma indirme ve aynı zamanda maliyetleri azaltma fırsatları sunacaktır. Kriko toplam 27 parçadan oluşmaktadır. Montaj sürecindeki zorlukları en aza indirmek, üretimi kolaylaştırmak ve maliyeti düşürmek için DfA ve DfAM yöntemlerini kullanarak yeni bir tasarım oluşturulmuştur. Kriko ürünü montajının eski tasarımında kullanılan parça kod, isim, malzeme ve adet sayılarını gösteren değerlendirme listesi Tablo 9’da verilmiştir.

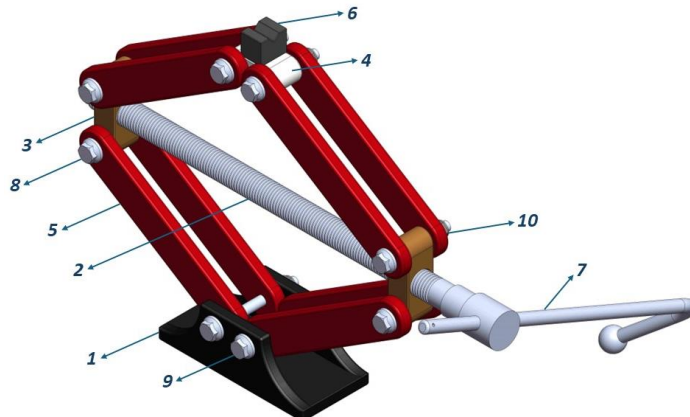


Şekil 9. Araç krikosuna ait eski tasarımın 3B modeli  
(3D model of the old design of a car jack)

Tablo 9. Kriko ürünü eski tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for the old design of a car jack)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	K-E-0000-0001	Taban	ST37	1
2	K-E-0000-0002	Alt destek	ST37	2
3	K-E-0000-0003	Üst destek	ST37	2
4	K-E-0000-0004	Alt bağlama parçası	ST37	2
5	K-E-0000-0005	Üst bağlama parçası	ST37	1
6	K-E-0000-0006	Vida	Ç1050	1
7	K-E-0000-0007	Takoz	Sert kauçuk	1
8	K-E-0000-0008	Kol	Transmisyon	1
9	DIN6921	M8x60 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	6
10	DIN6921	M8x80 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	2
11	DIN985	M8 Fiberli somun	Hazır	8

Eski tasarımın montajı sırasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu uygulamada kriko sistem montajındaki zorluklar saptanarak kolay monte edilebilir halde yeniden tasarlanmıştır. Şekil 10'daki yeni tasarım uygulamasının ardından kriko sistemi kolay montajını sağlamak amacıyla DfA ve DfAM prensipleri kullanılarak 31 parçadan oluştuğu gözlemlenmiştir. Eski tasarımda destek parçaları, destek alt ve destek üst parçaları olarak ayrılmışken, yeni tasarımda tek bir destek parçası tasarlanarak parça çeşitliliği azaltılmıştır. Destek parçalarındaki gereksiz malzeme ağırlığı, tasarımlarda değişikliğe gidilerek azaltılmış ve böylece maliyet de düşürülmüştür. Bu bağlamda, yeniden tasarım sürecinde tabana, destek parçalarına, takozla, alt ve üst bağlama parçalarına pah kırma, ayarlama, sabitleme ve gövde asimetrisini giderme gibi tasarım öğelerini dikkate alarak daha kolay montaj ve demontaj imkanları sağlanmıştır. Çoğu parçası döküm veya dövme gibi geleneksel metal işleme teknikleri ile üretilen kriko sistemi, yeni tasarımla birlikte özellikle destek parçaları lazer ile üretime uygun hale getirilmiştir. Sonuç olarak, maliyeti daha yüksek olan döküm veya dövme gibi üretim yöntemleri yerine daha uygun maliyetli bir yöntem olan lazer ile üretim tekniğine geçiş sağlanmıştır. Tasarımı tamamlanan yeni kriko Şekil 10'da gösterilmiş, değerlendirme listesi ise Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Araç krikosuna ait yeni tasarımın 3B modeli  
(3D model of the new design of a car jack)

Tablo 10. Kriko ürünü yeni tasarım için değerlendirme listesi (Evaluation list for jack product new design)

No	Parça Kodu	Parça Adı	Malzeme	Adet
1	PK-Y-0000-0001	Taban	ST37	1
2	PK-Y-0000-0002	Destek	ST37	8
3	PK-Y-0000-0003	Alt bağlama parçası	ST37	2
4	PK-Y-0000-0004	Üst bağlama parçası	ST37	1
5	PK-Y-0000-0005	Vida	Ç1050	1
6	PK-Y-0000-0006	Takoz	Sert kauçuk	1
7	PK-Y-0000-0007	Kol	Transmisyon	1
8	DIN6921	M8x60 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	6
9	DIN6921	M8x80 Altıköşe flanşlı civata	Hazır	2
10	DIN985	M8 Fiberli somun	Hazır	8

Eklenebilir imalat için tasarım prensipleri çerçevesinde gerçekleştirilen ağırlık azaltma işlemi, ürünün performansını ve verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamıştır. İki tasarım mukayese edilirse, Tablo 11’de de görüldüğü gibi kriko ürünü montajı 27 parçadan 31 parçaya çıkarılmıştır. Bunun sebebi destek parçalarındaki gereksiz malzeme israfını önlemek ve gövde asimetrisi yok edilerek daha kolay üretilen bir tasarım elde etmektir. Keskin parça köşeleri kavisli hale getirilerek montajda kolaylık sağlanmıştır. Kriko sisteminin çoğu parçası geleneksel metal işleme teknikleri olan döküm veya dövme ile üretilirken, yeni tasarım ile özellikle destek parçaları lazer ile üretim için uygun hale getirilmiştir. Bu sayede daha yüksek maliyetli döküm veya dövme gibi üretim yöntemleri yerine daha ekonomik bir seçenek olan lazer ile üretim yöntemine geçiş sağlanmıştır. En önemlisi, eski ve yeni kriko tasarımlarının imalatı arasındaki toplam zaman farkı azaltılmış ve bu sayede zamandan ve maliyetten tasarruf edilmiştir. Bu durum üründeki parçaların daha kolay bir şekilde monte edilebileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 11. Kriko ürünü montajı için eski ve yeni tasarımın karşılaştırılması (Comparison of old and new design for jack product assembly)

	Parça Sayısı (ad.)	Toplam Montaj Süresi (dk.)	Üretim Yöntemi
Eski Tasarım	27	20-25	Döküm veya dövme
Yeni Tasarım	31	15-20	Lazer kesim

Mevcut bazı örnek ürünler daha kolay imalat ve montaj açısından tekrar tasarlanıp ve parça sayıları azaltılarak daha basit hale getirilmeye çalışılmıştır. Böylece bu yeni tasarımların daha hızlı ve ekonomik üretimi mümkün olacaktır. Günümüzde AM; medikal, otomotiv, havacılık gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretimi zor olan karmaşık parçaların üretilmesi, maliyet tasarrufu, düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli parça üretimi gibi avantajları vardır. Ancak, seri üretim ve büyük parça üretiminde bazı sınırlamalara sahiptir [34]. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla eklenebilir imalat, maliyet düşürme avantajları sunarak uzay tabanlı faaliyetleri daha erişilebilir kılabilir. Son zamanlarda NASA, Alabama’daki Marshall Uzay Uçuş Merkezi’nde (MSFC), roket motoru bileşenleri için çeşitli AM tekniklerine yönelik yoğun Ar-Ge çalışmaları yapmıştır. Örneğin, AM tekniği kullanılarak üretilen koaksiyel girdaplı enjektör, küçük uydu fırlatma aracı programı için başarıyla test edilmiş ve NASA tarafından sıvı roket motoru uygulamalarında kullanılan birçok başarılı enjektör sıcak ateş testine tabi tutulmuştur [35]. Bunun yanı sıra, AM süreçlerindeki gelişmeler, medikal, dental ve endüstriyel uygulamaların artmasına da katkı sağlayabilir. Bazı süreçlerin gelecekte kullanılmaması veya yeni yöntemlerin piyasaya girmesi mümkündür [36]. Bu teknolojinin ilerlemesiyle birlikte AM süreçlerinin kapsamı, hızlı prototiplemeden başlayarak, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve diğer uygulamalara ait takımların ve nihai ürün parçalarının hızlı üretimi yapılabilir. AM teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla bir dizi avantaj sunsa da halen birçok endüstri tarafından ihtiyatla karşılanmaktadır. Bu nedenle, tasarımlar, malzemeleri, yeni süreçleri, makineler, süreç modelleme ve kontrol açısından gelişmeye daha fazla ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Böylece bu tür endüstri, araştırma ve sektörler tarafından daha fazla kabul görebilir [37].

## 5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmanın amacı, bir ürünün montaj edilebilirliğini değerlendirmede önemli olan ilkeleri göstermek olmuştur. DfAM yöntemleri kullanılarak ürünün montaj tasarımı için çeşitli uygulamalar ve elde edilen sonuçlara göre bu yöntemlerin ne derece etkin ve geçerli olduğu gösterilmiştir. Montaj kolaylığı için ürünün tasarım aşamasında olası problemleri önleyecek zaman, malzeme, işçilik ve maliyetten tasarruf edilmesi prensibine dayalı bir çalışma yapılmıştır. AM, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla bir dizi avantajlar sunar. Bu yöntem, tasarım serbestliği sağlayarak karmaşık geometrilerin kolayca üretilmesine imkân sağlar. Hızlı prototip üretimi sayesinde tasarım



değişiklikleri daha hızlı uygulanabilir ve ürün geliştirme süreçleri kısalmıştır. Malzeme tasarrufu, sadece ihtiyaç duyulan bölgelere malzeme eklenerek maliyetleri azaltır. Kişileştirilmiş üretim, müşteri taleplerine daha hızlı cevap verme olanağı sağlar. AM, entegrasyonu kolaylaştırır ve montaj sürecini basitleştirir. Düşük üretim maliyetleri ve çevre dostu üretim uygulamaları da bu yöntemin avantajları arasında yer alır. Bu nedenlerle, AM birçok endüstride giderek daha popüler hale gelmiştir. Ancak, her yöntemin kendine özgü avantajları ve kullanım alanları da vardır. Gelecekteki endüstriyel üretimde, DfA yaklaşımı ve AM yöntemleri, ürün tasarımını optimize ederek montaj verimliliğini artıracak, hataları azaltacak ve üretim maliyetlerini düşürecek önemli evrimlere yol açacaktır. AM, karmaşık geometrilili parçaların üretimi ve kişileştirilmiş ürünlerin geliştirilmesinde öncü bir rol oynayacak, malzeme kullanımını minimize ederek sürdürülebilir üretimi destekleyecek ve ayrıca hızlı prototipleme ile zaman tasarrufu da sağlayacaktır. Bu değişim havacılık, tıbbi cihazlar, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde, endüstri 4.0 ve dijital dönüşümü destekleyerek üretim süreçlerini daha esnek, verimli ve ekonomik hale getirecektir. Bu durum ürün özelleştirmesini teşvik, stok maliyetlerini düşürme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma gibi avantajlar sağlayabilir. Genel olarak bu çalışmada DfAM yaklaşımının kullanılması montaj ve bakım süreçlerini düşürdüğü, ürün tasarım sürecini azalttığı ve üretim maliyetlerini minimize ettiği görülmüştür. Malzeme israfını önleme, üretim ve montaj zorluklarını aşmak için DfAM veya kolay montaj için tasarım yaklaşımı kullanılabilir. Böylece tasarımı inceleme, gereksiz parçaları veya özellikleri azaltma (yani tasarımı sadeleştirme), montaj etkinliğini iyileştirme, zaman tasarrufu ve maliyeti düşürme amaçlanır. Bu bağlamda, bir tasarıma başlamadan önce montaj verimliliğini artırmaya yönelik değerlendirme yapılması gerekir. Bu araştırma benzeri çalışmalarda, mühendislik tasarımı metodolojileri ve elemanlarına aşına olunarak, sadece iyi montaj tasarımları değil aynı zamanda daha iyi ve daha ekonomik ürünler geliştirilebilir. Bunları gerçekleştirme için ise DfAM yaklaşımı ve kolay montaj kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] H. R. Börklü, *Mühendislik Tasarımı: Sistematik Yaklaşım*, Hatiboğlu Yayınları, Türkiye, 2010.
- [2] M. Aydın, "Makine Üretiminde Montaj İçin Tasarım Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [3] T. Bayyığıt, "Sistematik Yaklaşımla Kolay Montaj İçin Tasarım," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2013.
- [4] A. Ustundag, E. Cevikcan, O. F. Beyca, G. Hancerliogullari ve I. Yazici, *Industry 4.0: managing the digital transformation*, Springer, Türkiye, 2017, pp. 217-234.
- [5] H. K. Sezer, O. Eren, H. R. Börklü ve V. Özdemir, "Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites by Fused Deposition Modelling: Effect of Fiber Content and Process Parameters On Mechanical Properties," *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, no. 2, pp. 664-674, 2019. doi:10.17341/gazimmfd.416523
- [6] O. Doğan ve M. S. Kamer, "Eklemeli İmalat Yöntemi ile Optimum Düz Dişli Çark Tasarımı ve Üretimi," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no.3, pp. 1093-1103, 2021. doi:10.17798/bitlisfen.912566
- [7] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah ve A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, pp. 7936, 2020. doi:10.3390/su12197936
- [8] Ö. Kasar, "3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Düşük Maliyetli Çift Sırtlı Horn Anten Tasarımı ve Üretimi," *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol.1, no. 2, pp. 82-88, 2023.
- [9] S. Kaya, T. Güngördü ve M. A. Özel, "Eklemeli İmalat ile Üretilen Esnek Flap Mekanizmasının Tasarımı ve Yorulma Testi," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 23, no. 69, pp. 951-960, 2021. doi:10.21205/deufmd.2021236922
- [10] C. Şanlıer, H. R. Börklü ve C. Eldem, "Dizüstü Bilgisayar Sehpa Tasarımı: Geleneksel ve Yeni İmalat Yöntemleri İçin Yapılan Tasarımlar ve Karşılaştırılması," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 5, no. 1, pp. 65-75, 2021. doi:10.46519/ij3dptdi.836004
- [11] N. Top, H. Gökçe ve İ. Şahin, "Eklemeli İmalat için Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 18, no. 1, pp. 1-13, 2019.
- [12] D. S. Aydın, "Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme," *Journal of Aerospace Science and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 64-77, 2022.
- [13] M. Y. Kayacan ve M. Alshihabi, "Havacılık uygulamalarında eklemeli imalat için uyarlanabilir topoloji optimizasyonu,"

*Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 2, pp. 1-9, 2023. doi:10.5505/pajes.2023.52578

[14] C. Sinanoğlu ve H. R. Borklu, "An Assembly Sequence-Planning System For Mechanical Parts Using Neural Network," *Assembly Automation*, vol. 25, no. 1, pp. 38-52, 2005. doi:10.1108/01445150510578996

[15] G. Boothroyd, P. Dewhurst ve W. A. Knight, "Product Design for Manufacture and Assembly," *CRC Press*, 2010. doi: 10.1201/9781420089288

[16] S. Gao, R. Jin ve W. Lu, "Design for manufacture and assembly in construction: a review," *Building Research & Information*, vol. 48, no. 5, pp. 538-550, 2020. doi:10.1080/09613218.2019.1660608

[17] G. Boothroyd, "Assembly Automation and Product Design," *CRC Press*, 2005. doi:10.1201/9781420027358

[18] [Online]. Available: <http://www.dfma.com/> [Erişim: 21 Mayıs 2023].

[19] Ö. Karaçalı ve H. İ. Demirci, "Otomotiv Endüstrisinde Montaj İçin Tasarım Metodu," *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye* [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/275580377>. [Erişim: 1 Eylül 2023].

[20] M. Akdağ, "Otomotiv Sanayi İçin Ürün Geliştirme ve Düşük Maliyetli Yeni Ürün Tasarımı," *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye*, 2010.

[21] Z. Nihan, "McDonnell Douglas," Ekim 2010, [Online]. Available: <https://ucaklar.org/mcdonnell-douglas/> [Erişim: 15 Ağustos 2023].

[22] [Online]. Available: <https://docplayer.biz.tr/54965875-Imalat-ve-montaj-icin-tasarim-design-for-manufacturing-and-assembly-dfma.html> [Erişim: 20 Ağustos 2023].

[23] K. Özsoy ve B. Duman, "Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 1, no. 1, pp. 36-48, 2017.

[24] S. Çaşka, G. Ö. K. Kadir, M. Aydın ve İ. Özdemir, "Finite element method based structural analysis of quadcopter UAV chassis produced with 3D printer," *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, no. 044, pp. 24-32, 2020.

[25] H. K. Sürmen, "Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 373-392, 2019. doi:10.17482/uumfd.519147

[26] B. Aslan, "Yenilikçi Tasarım Yöntemleri Kullanarak Eklemeli İmalata Yönelik Optimum Ürün Geliştirilmesi," *Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye*, 2019.

[27] B. Duman ve M. C. Kayacan, "Seçmeli Lazer Sinterleme Tezgâhı için İmalat Yazılımı Geliştirilmesi," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 27-45, 2016.

[28] S. Dash, "Design of flexible lattice structures: a design for additive manufacturing perspective," *Lisans Tezi, Lund Üniversitesi, İsveç*, 2023.

[29] S. K. Mangla, Y. Kazancoglu, M. D. Sezer ve N. Top, İ. Şahin, "Optimizing fused deposition modelling parameters based on the design for additive manufacturing to enhance product sustainability," *Computers in Industry*, vol. 145, pp. 103833, 2023. doi: 10.1016/j.compind.2022.103833

[30] "Eklemeli İmalat Ürün ve Hizmetlerimiz," [Online]. Available: <https://digi-mode.com.tr/eklemeli-imalat/> [Erişim: 2 Eylül 2023].

[31] A. Wiberg, J. Persson ve J. Ölvander, "Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 1080-1094, 2019. doi:10.1108/RPJ-10-2018-0262

[32] M. Obi, "Investigating an approach for the dissemination of formalised Design for Additive Manufacturing knowledge," *Doktora Tezi, Loughborough Üniversitesi, Birleşik Krallık*, 2022. doi:10.26174/thesis.lboro.23633742.v1

[33] "Eklemeli İmalat Nedir?," [Online]. Available: [https://www.sfm yazilim.com/eklemeli\\_imalat\\_nedir.html](https://www.sfm yazilim.com/eklemeli_imalat_nedir.html) [Erişim: 20 Temmuz 2023].

[34] E. Karayel ve Y. Bozkurt, "Additive manufacturing method and different welding applications," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 11424-11438, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.08.039

[35] B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto ve A. Du Plessis, "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, 2021. doi:10.1016/j.matdes.2021.110008

[36] M. Salmi, "Additive manufacturing processes in medical applications," *Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 191, 2021. doi: 10.3390/ma14010191

[37] Z. Özgüner, *Eklemeli İmalat Sistemlerinin Endüstri 4.0 Kapsamında Uygulamaları*, Efeakademi Yayınları, Türkiye, 2022.

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





GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Design and Analysis of a Coaxial Magnetic Gear with Flux Concentrate Halbach Array

Murat Keleş<sup>a,\*</sup>, Cengiz Baykasoğlu<sup>b</sup>

Submitted: 20.07.2024 Revised: 06.11.2024 Accepted: 07.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR02

### ABSTRACT

**Keywords:** Magnetic gear, flux concentrate, Halbach, magnet grade, numerical analysis

<sup>a,\*</sup> TÜBİTAK Defense Industries Research and Development Inst. 06484 - ANKARA, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-8453-1287  
murat-keles@tubitak.gov.tr

<sup>b</sup> Hitit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 19030 - CORUM, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7583-7655  
cengizbaykasoglu@hitit.edu.tr

\*Corresponding author:  
murat-keles@tubitak.gov.tr

Magnetic Gears (MG), which can operate under antifriction and unlubricated conditions, have the potential to meet the needs of many areas, especially the aviation and defense sectors. In this context, it is very important to develop MG designs that can meet the specific requirements in these areas. With this motivation, a coaxial MG with a power transmission ratio of 5.33 has been designed and optimized in this study by incorporating Flux-Concentrated Halbach Array (FCHA) magnets, and a power transmission mechanism that can be utilized especially in Fin Actuation System (FAS) is developed by performing Numerical Electromagnetic Analysis (NEA). Different geometric parameters are determined as variables in the FCHA design and the performance improvement study is carried out by developing various models. Accordingly, by comparing the effects of design parameters on the MG performance, the geometric model in which the Volumetric Torque Density (VTD) reached the highest value is determined. Numerical analysis results showed that the optimized FCHA increases VTD by 32% compared to the Halbach array. As a result of parametric analysis studies, MG system with VTD value of 225.7 Nm/L, which satisfies ideal design criteria, is obtained. Considering the optimized MD design, torque ripple and flux density are examined and also the effects of different magnet grades on the performance and the structural analysis of the middle rotor are investigated.

## Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilimli Bir Eş Eksenli Manyetik Dişli Tasarımı ve Analizi

### ÖZ

Yağsız ve sürtünmesiz koşullarda çalışabilen Manyetik Dişlilerin (MD) havacılık ve savunma sektörleri başta olmak üzere birçok alanda ortaya çıkan ihtiyaçları karşılama potansiyeli vardır. Bu bağlamda, bu alanlardaki özel gereksinimlere cevap verebilecek manyetik dişli tasarımlarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu motivasyonla, bu çalışmada Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilimine (AKHD) sahip mıknatıslar ile beraber güç aktarma oranı 5.33 olarak tasarlanmış bir eş eksenli MD'nin Elektromanyetik Sayısal Analizleri (ESA) gerçekleştirilerek özellikle Kanatçık Tahrik Sisteminde (KTS) uygulanabilecek bir güç aktarma mekanizması geliştirilmiştir. AKHD'li tasarımda farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp çeşitli modeller geliştirilerek performans iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, tasarım parametrelerinin MD performansına olan etkileri karşılaştırılarak Hacimsel Tork Yoğunluğunun (HTY) en yüksek değere ulaştığı geometrik model belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları en iyilenmiş AKHD'nin, Halbach dizilime göre HTY'yi %32 oranında arttırdığını göstermiş ve parametrik analiz çalışmalarının sonucu olarak ideal tasarım ölçütlerini sağlayan 225.7 Nm/L HTY değerine sahip bir MD sistemi elde edilmiştir. En iyilenmiş MD tasarımı dikkate alınarak performans kriterlerinden tork dalgalanması ve akı yoğunluğu analiz edilerek farklı mıknatıs seviyelerinin performans etkileri incelenmiş ve orta rotorun yapısal davranışı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik dişli, akı konsantrasyon, Halbach, mıknatıs seviyesi, sayısal analiz

## 1. Giriş (Introduction)

Savunma ve havacılık sektörlerine ilişkin birçok uygulamada sistemlerin veya mekanizmaların yüksek verimlilikte çalışacak şekilde tasarlanmaları oldukça kritik olup, bu tasarımlarda yeni teknolojiler ve yaklaşımların dikkate alınması kaçınılmazdır. Savunma sanayii sektörünün en önemli konuları arasında olan mühimmat teknolojilerinde bu yeni teknoloji ve yaklaşımların izlerini takip etmek mümkündür. Bu bağlamda, gelişmiş menzile sahip, hassas vuruş kabiliyetli ve maliyeti etkin yeni nesil mühimmat teknolojileri özgün tasarımlar ve yaklaşımlar uygulanarak sürekli geliştirilmektedir. Hava platformlarının yüksek maliyetleri ve risklerinden dolayı, havadan karaya atılan mühimmatların hedefi başarılı şekilde imha etmesi istenmektedir. Hedeflerin tek atışta yok edilebilmesi için mühimmatın yönelimini sağlayabilen Kanatçık Tahrik Sisteminin (KTS) kullanımı gereklidir. Öte yandan, mühimmat yöneliminin başarılı olabilmesi için KTS'nin performansını olumsuz etkileyecek tüm parametrelerin kontrolü sağlanarak, olası hataların minimize edilmesi gerekmektedir [1]. Aksi durumda, KTS seviyesinde oluşabilecek bir hata, mühimmat oto pilotunun davranışını değiştireceği için istenmeyen uçuş durumları meydana gelebilir [2]. Bu noktada, KTS'lerden istenilen performansın elde edilebilmesi için mevcut mekanizmaların performansları iyileştirilmiş veya birçok yeni mekanizma geliştirilmiştir [3-6]. KTS gibi sistemlerde güç aktarma organları için yüksek verimliliğe sahip mekanizmaların tasarımı kullanılması gerekmektedir. Bu noktada, mekanik dişliler yüksek aktarma oranı gereken uygulamalarda çoğunlukla tercih edilmektedir. Diğer yandan, mekanik dişlilerin titreşimli, yağlı ve gürültülü şekilde çalışmaları sistem tasarımını zorlaştırmakta olup, bu dişlilerin bakım maliyetlerinin azaltılması, ömürlerinin iyileştirilmesi ve yağsız şekilde kullanımları gibi konularda çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

Sistem gereksinimlerinin farklılaşması ve teknolojinin ilerleyişi ile mekanik dişlilerin yetersiz olduğu sistemlerde güç aktarımında kullanılabilecek Manyetik Dişliler (MD) son yıllarda yoğun ilgi çekmektedir [7]. Mıknatısların kimyasal yapısına 1980'li yıllardan sonra ender bulunan toprak elementlerinin eklenmesi ile meydana gelen NdFeB mıknatıslarının keşfi MD'lerin araştırılmasını ileri seviyeye taşımıştır. MD'lerin yağsız ve temassız çalışabilme yetenekleri, düşük titreşim seviyeleri ve sistemi aşırı yükten korumaları gibi özelliklerinden dolayı her geçen gün kullanım alanları genişlemektedir [8,9]. Literatürde en çok araştırılan MD tiplerinden biri olan eş eksenli MD'lerin kullanımında mıknatısların doğasında olan itme ve çekme kuvvetlerinin tork yükü oluşturması sağlanarak belirli aktarma oranında güç aktarımı sağlanmaktadır [10]. Bir eş eksenli MD, İç Rotor (İR), Orta Rotor (OR) ve Dış Rotor (DR) olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 1). DR ve İR'de özel sayılarda ve farklı tasarımlarda mıknatıs çiftleri bulunurken, OR bölümüne DR ve İR ile uyumlu özel tasarıma sahip ferromanyetik malzeme yerleştirilmektedir. MD tasarımlarında genel olarak OR ve İR dönüş ekseninde harekete izin verilecek şekilde mekanik olarak yataklanmakta ve DR kaideye sabitlenmektedir. MD güç aktarımında yavaş dönen kısım OR çıkış ve hızlı dönen kısım İR giriş olarak tanımlanmaktadır. Bazı çalışmalarda ise İR ve DR'de dönüşel hareket izin verilmiş ve OR sabitlenerek güç aktarımı sağlanmıştır [11].

MD'lerin performansının ortaya konmasında en önemli kriterlerinden olan Hacimsel Tork Yoğunluğu (HTY), çıkış kısmından elde edilen torkun, mıknatısların oluşturduğu aktif hacme oranı şeklinden tanımlanmaktadır [12]. HTY'nin artışı ile MD'lerin performansı mekanik dişli performansına yaklaşmaktadır [13]. MD'ler HTY'nin düşük olması sebebi ile başlangıçta çok fazla ilgi görmemişlerdir. Öte yandan, Atallah ve Howe [14], 2001 yılında farklı bir topoloji önererek nispeten yüksek performanslı eş eksenli MD tasarlamışlardır. Bu noktada, diğer güç aktarma organları ile kıyaslandığında HTY değerinin umut verici olması alternatif tasarımların geliştirilmesinde yol gösterici olmuştur [15,16]. Praslicka ve ark. [17], mıknatısların dizilimi, sınıflarının seçimi, sayılarının belirlenmesi üzerinde çalışmışlar ve mekanik tasarım boşluklarının MD performansına etkilerini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada, Li ve Bird [18], farklı boy ve çaplarda parametreler belirleyerek MD performanslarını karşılaştırmışlar ve iyileştirme çalışmaları kapsamında optimum parametrelerin belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirmişlerdir.

MD'deki mıknatıs çifti sayısı ve mıknatıs geometrileri ile OR'nin geometrisi HTY'nin en iyilenmesinde dikkate alınacak önemli parametrelerdir [2]. Diğer taraftan, OR'nin ferromanyetik malzemeden imal edilerek akı iletiminin rahat şekilde sağlanması ve manyetik alan geçirgenliğinin yüksek olması arzu edilir [19]. Bu kapsamda, OR'de laminasyonlu çelik kullanılarak manyetik kayıpların azaltıldığı gösterilmiştir [20]. Ayrıca, ferromanyetik malzeme olarak 1008 çelik tasarımlarda sıklıkla tercih edilmektedir. MD'ler de manyetik tasarımın kutup yönlerinin seçimi mıknatısların güney ve kuzey

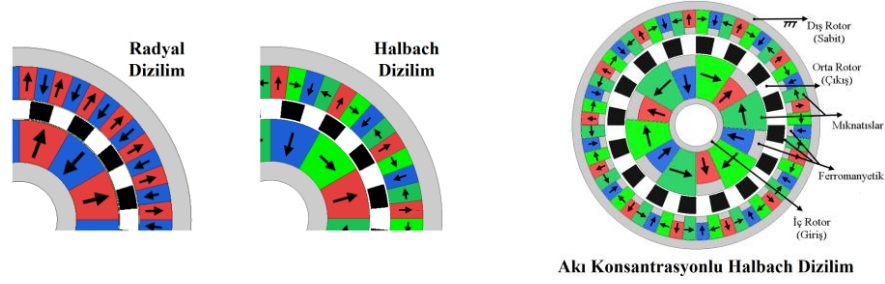
kutuplarının dizilimine göre önem kazanmaktadır. Bu noktada, manyetik alan içerisindeki kayıpların artmaması için mıknatıs diziliminde genel olarak kullanılan Radyal Dizilim (RD) yerine özel Halbach Dizilim (HD) yöntemi alternatif olarak kullanılmaktadır [21]. MD'de HD kullanımı ile RD'ye göre aynı hacim ve geometride daha yüksek çıkış torku elde edilerek HTY'ye olumlu katkısı gösterilmiştir [22]. Ayrıca, literatür çalışmalarında HD'de bulunan Teğet Yönlü (TY) mıknatısların hacim olarak daha fazla olması akı yoğunluğunu arttırdığı için bu tip yapı Akı Konsantrasyonlu Halbach Dizilim (AKHD) olarak adlandırılmaktadır. AKHD'nin aktif hacimde HTY'nin artırılmasına pozitif etkisi sayısal analizlerde gösterilmiştir [23]. MD'ler de mıknatısların oluşturduğu manyetik yönlendirmenin ana kaynağı olan manyetik akının yoğunluğu akademik çalışmalarda sayısal analizler ile irdelenmiştir. Atallah ve ark. [15] akı yoğunluğunu hesaplamak için İR ile OR arasındaki boşluk ve OR ile DR arası kalan boşluk orta noktalarından sayısal analiz ile  $360^\circ$  veri tarayarak uzaysal harmonik analiz ile MD'nin belirlenen kutup çifti sayılarının baskınlığını incelemişlerdir. Mıknatısların doğal yapısında olan akı yoğunluğunun değişkenlik göstermesi MD'de elde edilen tork değerlerinde dalgalanma olmasına sebep olmaktadır. Tork dalgalanması ne kadar az olursa güç aktarımı o kadar pürüzsüz olmakta ve yapılan çalışmalarda çıkış ve giriş tork dalgalanma değerinin genel olarak %0.2 ile %5 arasında olduğu gösterilmiştir [12]. Öte yandan, kimyasal yapılarından dolayı manyetizasyon şiddetleri farklı seviyelerde olan N35 ile N52 arasında mıknatıslar üretilmekte ve mıknatıs seviyelerine göre akı değerleri değişkenlik göstermektedir. Tallero ve ark. [19] NASA'da yapılan çalışmada HD'li farklı seviyelerde mıknatıslar kullanılarak analizler gerçekleştirilmişlerdir. İR ve DR'de N52 kullanarak 278 Nm çıkış torku elde ederken, İR'de N50 ve DR'de N48 kullanarak 311 Nm çıkış torku elde etmişlerdir. Bu sonuç, yüksek seviyeli mıknatıslardan oransal bir iyileşmenin aksine daha düşük çıkış torkunun ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Bu noktada, yüksek seviyeli mıknatısların birbirlerinin manyetikliklerini etkilemesi akı değerini olumsuz etkilemiş ve buda HTY değerini düşürmüştür.

MD'ler de ilk tasarım süreçlerine Elektromanyetik Sayısal Analiz (ESA) ile 2 Boyutlu (2B) elektromanyetik alan ve akı hesaplamaları gerçekleştirilip, mıknatıs kutup çiftlerinin birbirine uyguladığı itme ve çekme kuvvetlerinin analizi gerçekleştirilmektedir. Sayısal analizlerde, genelde ANSYS MAXWELL®, COSMOS® veya JMAG® gibi yazılımlardan faydalanılarak statik veya dinamik elektromanyetik hesaplama yöntemleri ile ESA gerçekleştirilmektedir [17,20,24,25].

Literatürde MD'lerin performanslarına etki eden parametrelerin analizi ile sektörel alanda uygulamalarına yönelik halen çok az sayıda çalışma mevcuttur. Ayrıca, MD'lerin, KTS gibi hassas mekanizmalarda uygulanabilirliği ilgili kapsamlı bir araştırma literatürde mevcut değildir. Bu motivasyonla, bu çalışma kapsamında örnek bir KTS için amaçlanan aktarma oranı ve HTY değerlerine ulaşmaya olanak verecek HD'li ve AKHD'li MD tasarımları geliştirilmiştir. Bu noktada, sayısal hesaplamalar gerçekleştirilerek HD ve AKHD'ye göre mıknatıs yönleri belirlenmiş ve çeşitli tasarım parametreleri dikkate alınarak performans iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MD performansını etkileyen akı ve tork dalgalanmaları analizlerden elde edilmiş ve farklı mıknatıs seviyeli MD konfigürasyonlarından elde edilen HTY değerleri karşılaştırılarak mıknatıs seviyelerinin sonuçlara etkileri incelenmiştir. Ayrıca, MD tasarım çalışmaları kapsamında kritik bileşen olan OR'nin yapısal analizi gerçekleştirilerek ortaya çıkan gerilme ve deformasyon durumu incelenmiştir.

## 2. Manyetik Dışlı Tasarımları (Magnetic Gear Designs)

Önceki bölümde belirtildiği gibi MD'ler genel çalışma prensibi olarak DR'si sabit bir kaideye bağlanmış, OR ve İR ile beraber iç içe dönüşel hareketi olan sistemlerdir. İR ve DR'deki mıknatısların birbirleri üzerindeki manyetik akı etkisi ile OR'ye güç aktarımı yapılarak belirli bir aktarma oranında dişli kutusu gibi çalışmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Eş eksenli bir MD  
(A Coaxial MG).

Bu bölümde MD ana tasarım parametre hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve amaçlanan aktarma oranı için kutup çifti sayıları belirlenmiştir. Ayrıca, parametrik performans iyileştirme çalışmaları yapılmış ve en yüksek HTY değeri için AKHD tasarımı elde edilmiştir. MD sisteminin ana denklemleri mıknatıs kutup çifti ve segment sayılarının arasındaki ilişkilere göre denklemler farklılık göstermezler. Sayılar arasındaki bağıntılar ile güç aktarım sisteminin en önemli performans kriteri olan aktarma oranı belirlenmektedir. MD'ye ait genel denklemler aşağıda sunulmuştur.

$$n_2 = p_1 + p_3 \quad (1)$$

$$\omega_2 n_2 = \omega_1 p_1 + \omega_3 p_3 \quad (2)$$

$$T_1 \omega_1 + T_2 \omega_2 + T_3 \omega_3 = 0 \quad (3)$$

Burada,  $n_2$  OR'de bulunan ferromanyetik segment sayısı,  $p_1$  İR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısı ve  $p_3$  DR'de bulunan mıknatısların kutup çifti sayısıdır. Ayrıca, İR tork değeri  $T_1$ , OR tork değeri  $T_2$ , İR açısal hız  $\omega_1$ , OR açısal hız  $\omega_2$  ve aktarma oranı  $G_{12}$ 'dir. DR sabit olduğunda  $\omega_3 = 0$  olmaktadır. Bu noktada, Eş. 2 ve Eş. 3 sadeleştirilerek aktarma oranı hız veya tork değerlerinin oranları şeklinde tanımlamakta ve eş eksenli MD için sürtünme ve manyetik kayıplar ihmal edildiğinde, Eş. 7'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\omega_1 = \frac{n_2}{p_1} \omega_2 \quad (4)$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_2}{p_1} = G_{12} \quad (5)$$

$$T_1 \omega_1 = -T_2 \omega_2 \quad (6)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{n_2}{p_1} = -G_{12} \quad (7)$$

Aktarma oranının eksi (-) işaretli bulunması, OR ve İR'nin dönüş yönlerinin birbirine göre ters olduğunu belirtmektedir. Bu çalışmada; OR ve İR merkez eksene göre dönecek ve DR sabit olacak şekilde MD tasarımı gerçekleştirilmiştir. HTY değeri, MD'nin performansı açısından önemli kriterlerden biri olup, çıkış tork değerinin ( $T_2$ ) aktif hacme bölümünden aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [21].

$$\text{HTY} = \frac{T_2}{\pi R_o^2 l} \quad (8)$$

Burada,  $R_o$  aktif hacmin dış yarıçap ölçüsü ve  $l$  aktif hacmin boyu olarak tanımlanmıştır. KTS uygulamalarında kullanılacak bir güç aktarma elemanından beklenen performans gereksinimleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada, aktarma oranı ve HTY değerinin yanı sıra hacim kısıtları açısından Tablo 1'de verilen dış yarıçap ve boy değerleri tasarımlarda dikkate alınmıştır.

Tablo 1. MD performans ve tasarım gereksinimleri (MG performance and design requirements)

Parametre	Değer	Birim
Dış yarıçap	45	mm
Aktarma oranı	~5-6	
HTY	~210-230	Nm / L
Aktif Boy	50	mm

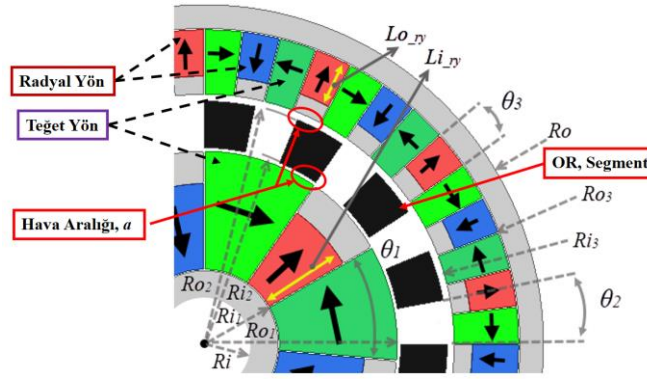
Amaçlanan aktarma oranının ortaya çıkarılabilir potansiyeli olan  $p_1$ ,  $n_2$  ve  $p_3$  parametrelerinin belirlenmesi için farklı tasarım kombinasyonları oluşturulmuştur. Tablo 2’de farklı parametreler için elde edilen aktarma oranları sunulmuştur.

Tablo 2. Kutup çifti sayıları ve aktarma oranı (Number of pole pairs and transmission ratio)

$p_1$	$n_2$	$p_3$	Aktarma Oranı	No	$p_1$	$n_2$	$p_3$	Aktarma Oranı	No
2	7	5	3.5	1	3	18	15	6	20
	8	6	4	2		19	16	6.33..	21
	9	7	4.5	3		20	17	6.66..	22
	10	8	5	4		21	18	7	23
	11	9	5.5	5		22	19	7.33..	24
	12	10	6	6		26	23	8.66..	25
	13	11	6.5	7		32	29	10.66..	26
	14	12	7	8		9	5	2.25	27
	15	13	7.5	9		11	7	2.75	28
3	8	5	2.66..	10	15	11	3.5	29	
	9	6	3	11	17	13	4.25	30	
	10	7	3.33..	12	19	17	4.75	31	
	11	8	3.66..	13	22	18	5.5	32	
	12	9	4	14	23	19	5.75	33	
	13	10	4.33..	15	24	20	6	34	
	14	11	4.66..	16	25	21	6.25	35	
	15	12	5	17	26	22	6.5	36	
	16	13	5.33..	18	27	23	6.75	37	
17	14	5.66..	19						

MD uygulamalarında arzu edilen aktarma oranı ve performansı sağlayacak tasarım parametrelerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken çeşitli hususlara literatürde vurgu yapılmıştır. Bu hususlar ve bunlara göre tasarım parametrelerin nasıl belirlendiği takip eden satırlarda tartışılmıştır. OR segment sayısının  $n_2$ , çift sayı seçildiğinde Radyal Yönde (RY) kuvvetlerin eşit yoğunlukta dağıldığı ve mekanik esnemelerin en aza indirildiği gösterilmiştir [26].  $n_2$  sayısının çift olduğu tasarım parametreleri Tablo 2’de kırmızı ile gösterilmiştir. Harmonik etkilerin en aza indirilmesi noktasında  $p_1$  ve  $p_3$  kutup çifti sayılarının asal sayı kullanılmasının pozitif etkisi ayrıca çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [26]. Tablo 2’de asal sayı olanlar açık yeşil renk ile belirtilmiştir. Bu iki kriteri aynı anda sağlayan tasarımlar ayrıca Tablo 2’de açık mavi renkli olarak belirtilmiştir. Aktarma oranının kesirli sayı olması durumunda, gürültülerin ve oluşan tork dalgalanmaları azaldığı çeşitli çalışmalarda da gösterilmiştir [26]. Bu kriterleri sağlayan tasarımlar (10, 12, 16, 18, 22, 24, 25 ve 26 nolu) Tablo 2’de koyu renkli olarak belirtilmiştir. Bu bağlamda, sadece  $p_1$  kutup çifti sayısı 3 olan tasarımların isterleri sağladığı Tablo 2’den görülmektedir. Tablo 1’de verilen hedef dış yarıçap kısıtlaması İR ve DR’de düşük sayıda kutup çiftinin seçilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple,  $p_1$ ,  $n_2$  ve  $p_3$  değerleri sırasıyla 3, 16, 13 olan 18 nolu tasarım ön tasarım olarak belirlenmiştir. Aktif boy ve dış yarıçap kısıtları dikkate alınarak belirlenen MD ön tasarım parametreleri (Şekil 2) Tablo 3’de sunulmuştur. MD’nin iç içe dönen yapısı gereği birbirine temas etmemesi gerekmektedir. Özellikle, HTY değeri yüksek olan literatür çalışmalarında rotorlar arası dönme boşluğu olarak adlandırılan hava boşluğu en az seviye tutularak yüksek tork çıktılarını ile performansı artırıcı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır [13]. Bu tasarımda, hava boşluğu değeri literatür çalışmaları incelenerek ve geometrik üretilebilirlik dikkate alınarak 0.5 mm seçilmiştir. [27]. Ayrıca, mıknatıs malzemesi olarak, ilk tasarımda literatürde sıklıkla kullanılan N42 kalite grubu yaklaşık 1.24 T akı yoğunluğuna sahip mıknatıs tipi seçilmiştir. Parametrik çalışmalar kapsamında öncelikli olarak Halbach MD tasarım için Tablo 3’te verilen  $Ro_1$  ve  $Ri_3$  parametreleri değişken olarak tanımlanıp performansa etkileri incelenmiş, ardından AKHD için  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $Li_{ry}$  ve  $Lo_{ry}$  değişkenleri dikkate alınarak bu yaklaşımın performansa etkileri araştırılmıştır.





Şekil 2. MD tasarım parametreleri  
(Desing parameters of MG)

Tablo 3. Halbach MD tasarım parametreleri (Design parameters of Halbach MG)

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim		
İR	$Ri_1$	14	mm	DR	$Ri_3$	31.0	mm
	$Ro_1$	24	mm		$Ro_3$	40.0	mm
	$p_1$	3	-		$p_3$	13	-
	$\theta_1$	$180/(2p_1)$	°		$\theta_3$	$180/(2p_3)$	°
	$Li_{ry}$	5	mm		$Lo_{ry}$	4.5	mm
	Malzeme	1008			Malzeme	1008	
OR	$Ri_2$	24.5	mm	Diğer	NdFeB	1.24	T
	$Ro_2$	29.5	mm		$Ri$	10	mm
	$n_2$	16	-		$Ro$	45	mm
	$\theta_2$	$180/(n_2)$	°		$a$	0.5	mm
	Malzeme	1008			$l$	50	mm

### 3. Elektromanyetik Sayısal Analizler (Electromagnetic Numerical Analysis)

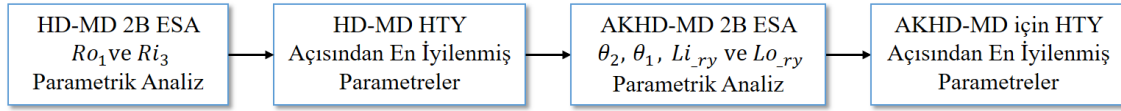
Literatürde 2B ile 3B ESA'dan elde edilen veriler yüksek oranda benzerlik gösterdiğinden parametrik analizlerde hesaplama yükünün düşürülmesi için ilk tasarım ve en iyileme süreçlerinde 2B sayısal modelleme yaklaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. Tablo 3'te belirtilen değerler için ANSYS® Maxwell 2D Magnetostatic yazılım modülü kullanılarak oluşturulan katı modelde ilk olarak sınır koşulları ve malzemeler tanımlanmıştır. Mıknatısların RY ve TY yönleri Şekil 2, NdFeB mıknatısın akı yoğunluğu değeri ise Tablo 3'e göre 1.24 T olarak tanımlanmış ve ESA için manyetik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. MD'nin birbirine temas etmeyen bölgeleri vakumlu olarak tanımlanmıştır. OR malzemesi olarak mıknatısların oluşturduğu manyetik akıya hızlı ve iyi tepki verebilen bir ferromanyetik olan demir oranı yüksek AISI 1008 çeliği seçilmiştir. Analiz sınır şartları çerçevesinde İR hızı sıfır alınarak OR dönme eksenini etrafında serbest bırakılmış ve OR'den alınan en yüksek tork değerini veren pozisyona sabitlenmiştir. Sayısal analizlerin tümü bu pozisyon değerinde gerçekleştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Tablo 3'de verilen parametreler ve RD ve HD dikkate alınarak MD'nin ilk sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te iki tip MD için hesaplanan en yüksek tork ve HTY değerleri verilmiştir. Tablo 4'den açıkça görülebileceği gibi RD tipli MD performans hedeflerinin uzağında kaldığından parametrik çalışma sonraki bölümde sadece HD dizilim dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. RD ve HD için ESA sonuçları (Numerical electromagnetic analysis results for radial and Halbach arrays)

Parametre	Tasarım		Birim
	RD	HD	
Giriş Tork	6.45	10.2	Nm
Çıkış Tork	-34.2	-54.5	Nm
Aktarma Oranı	~5.3	~5.34	-
HTY	107.5	171.3	Nm/L

### 3.1. Parametrik çalışma (Parametric study)

MD performansının HTY açısından en iyilenmesi için gerçekleştirilen parametrik çalışmalarının akış şeması Şekil 3'te verilmiştir. İlk aşamada HD'ye etki eden kritik parametrelerin etkisi, sonrasında ise HD tasarımına AKHD yaklaşımı uygulanarak farklı parametrelerin HTY üzerindeki etkileri incelenmiştir.

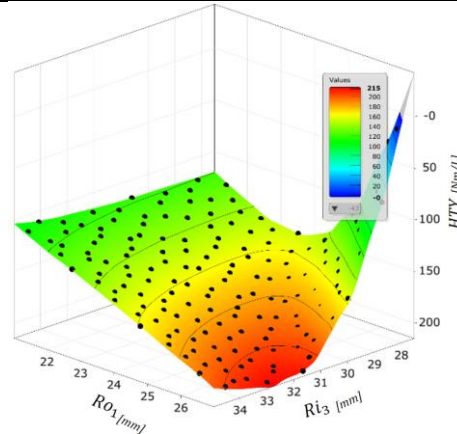


Şekil 3. Parametrik çalışma akış şeması  
(Flow chart of parametric study)

MD en iyileme çalışmaları için ilk olarak TY ve RY mıknatısları aynı uzunlukta seçilerek HD mıknatıs modeli incelenmiştir. Bu bağlamda,  $Ro_1$  ve  $Ri_3$ , Tablo 5'te belirtilen aralıklarda değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 5. HD'li MD analizinde dikkate alınan parametreler (Parameters taken into account in the analysis of MG with Halbach array)

Parametre	Değer Aralığı	Birim
$\dot{I}R, Ro_1$	$21 \leq Ro_1 \leq 27$	mm
$DR, Ri_3$	$27.5 \leq Ri_3 \leq 35$	mm



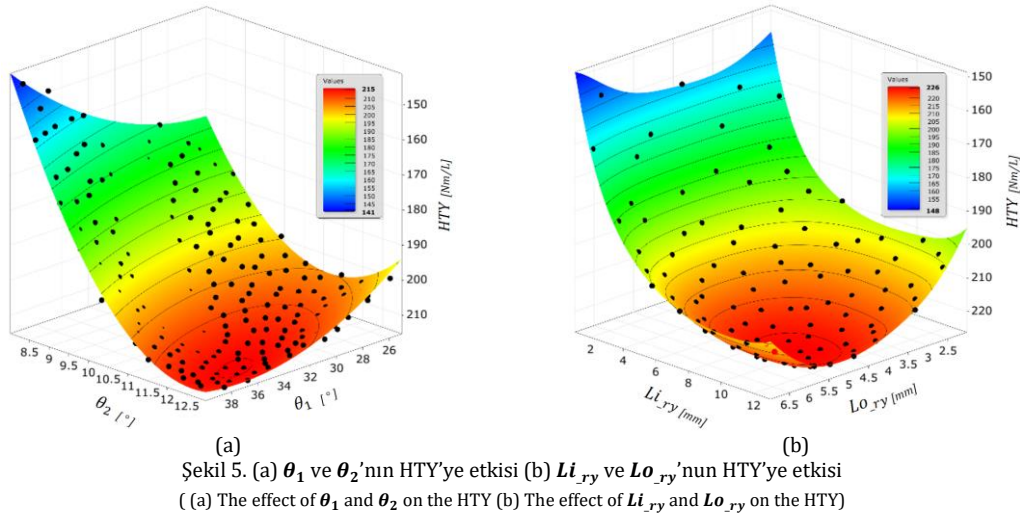
Şekil 4.  $Ro_1$  ve  $Ri_3$ 'nin HTY'ye etkisi  
(The effect of  $Ro_1$  and  $Ri_3$  on the HTY)

Tablo 5'te belirtilen parametrelerin yaklaşık 300 farklı kombinasyonda sayısal çözümleri elde edilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları  $Ro_1$  parametresinin HTY performansına etkisinin  $Ri_3$  parametresine göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Dikkate alınan değişken aralığında  $Ro_1$  değerinin artışı HTY'yi dikkate değer ölçüde iyileştirmiş olup, 27 mm civarında HTY en yüksek değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde,  $Ri_3$  değerinin artışı HTY'yi dikkate değer ölçüde iyileştirmiş olup, 32 mm civarında HTY en yüksek değerine ulaşmıştır. Halbach dizimli MD'de iki değişkenin HTY'ye etkisi Şekil 4'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar ile HTY değerinin en yüksek olduğu nokta tahmin edilmiş ve o noktadaki parametreler kullanılarak sayısal analiz ile tekrar çözüm elde edilerek %99.5 uyumluluk yakalanmıştır. Bu bağlamda, Halbach dizimli MD'nin optimum parametreleri  $Ro_1=26.95$  mm ve  $Ri_3=32.65$  mm olarak elde edilmiştir. 214.3 Nm/L'lik HTY'ye sahip eş eksenli MD tasarımı HD-2 olarak Tablo 7'de ifade edilmiştir. Belirlenen parametreler AKHD'li MD'nin TY mıknatıs boyları için başlangıç parametreleri olarak kabul edilip, AKHD MD'nin performans en iyileme çalışmaları kapsamında Tablo 6'daki parametreler dikkate alınarak etkileri incelenmiştir.

Tablo 6. AKHD'li MD tasarım parametreleri (Design parameters of FCHA MG)

Parametre	Değer Aralığı	Birim
İR, $\theta_1$	$25 \leq \theta_1 \leq 38$	°
OR, $\theta_2$	$8 \leq \theta_2 \leq 13$	°
İR, $Li_{ry}$	$2 \leq Li_{ry} \leq 12$	mm
DR, $Lo_{ry}$	$2 \leq Lo_{ry} \leq 11$	mm

İlk olarak  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açıları dikkate alınarak verilen değer aralıkları için parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve HTY'nin  $\theta_1$  açısına duyarlılığı %95 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.a'ya göre HTY'nin en yüksek olduğu noktada tasarım parametreleri  $\theta_1 = 35.3^\circ$  ve  $\theta_2 = 12.18^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin tasarımda uygulanması ile HTY %1.5 oranında (215.3 Nm/L) artmıştır. Uygun  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  açılarının belirlenmesi sonrası  $Li_{ry}$  ve  $Lo_{ry}$  parametrelerinin en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. HTY'nin, İR parametrelerinden  $Li_{ry}$ 'ye duyarlılığı %86 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.b'ye göre HTY'nin en yüksek olduğu noktada tasarım parametreleri  $Li_{ry} = 9.77$  mm ve  $Lo_{ry} = 4.87$  mm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin tasarımda uygulanması HTY'nin %5 oranında (225.7 Nm/L) artmasına neden olmuştur.



Parametrik en iyileme çalışmalarından elde edilen tahmini değerler ile tekrar sayısal çözümleme yapılmış ve %99.8 uyumluluk yakalanmıştır. Sonuç olarak, AKHD MD parametrik çalışmalarından  $Ro_1=26.95$  mm,  $Ri_3=32.65$  mm,  $\theta_1 = 35.3^\circ$  ve  $\theta_2 = 12.18^\circ$ ,  $Li_{ry} = 9.77$  mm ve  $Lo_{ry} = 4.87$  mm nihai tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Eş eksenli MD parametrik çalışmalardan farklı tasarımlar için elde edilen sonuçlar Tablo 7'de özetle sunulmuştur.

Tablo 7. Tüm tasarımların performanslarının karşılaştırması (Comparison of performances of all designs)

Parametre	Tasarım				Birim
	RD	HD	HD-2	AKHD	
Giriş Tork	6.45	10.2	12.72	13.47	Nm
Çıkış Tork	-34.2	-54.5	-68.16	-71.8	Nm
Aktarma Oranı	~5.3	~5.34	~5.35	~5.34	-
HTY	107.5	171.3	214.3	225.7	Nm/L

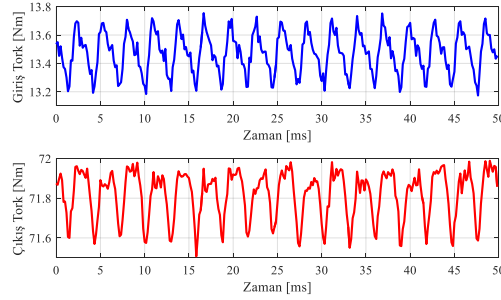
### 3.2. Tork dalgalanması analizi (Torque ripple analysis)

En iyilenmiş tasarım parametrelerine göre oluşturulmuş modele ait giriş ve çıkış tork değerlerinin zamana bağlı ESA çözümleri incelendiğinde tork değerlerinde dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Bu dalgalanmalar, MD'nin doğası gereği manyetik alanın dinamik değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. AKHD MD için zamana bağlı çözümlenmiş tork değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Giriş ve çıkış için tork dalgalanma değerleri Eş. 9 ile hesaplanmıştır. AKHD'li MD çıkış tarafı 100 dev/dk dönerken tork dalgalanması %0.67, giriş tarafı 533 dev/dk dönerken tork dalgalanması %4.67'dir.



Giriş tarafında kullanılan mıknatısların hacimsel açıdan büyük olması, OR segment sayısının İR kutup çifti sayısından daha fazla olması gibi nedenler giriş ve çıkışta farklı tork dalgalanmalarının gözlemlenmesine neden olmaktadır.

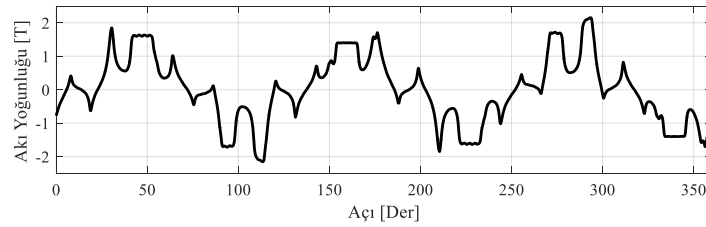
$$T_{dalgalanma} = \frac{T_{en\ yüksek} - T_{en\ az}}{T_{ort}} * 100 \quad (9)$$



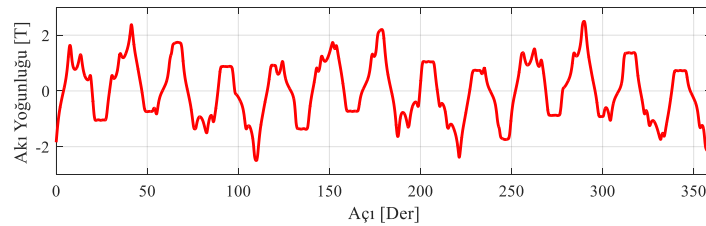
Şekil 6. Giriş ve çıkış için tork dalgalanma analizi (Torque ripple analysis for in and out)

### 3.3. Akı yoğunluğu (Flux density)

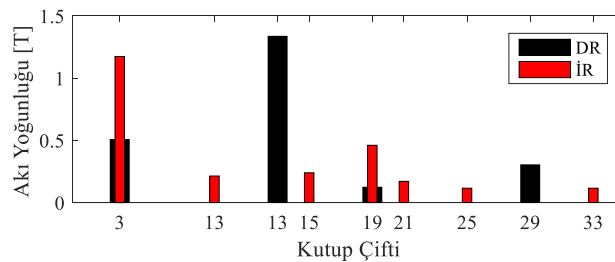
AKHD MD'de İR-OR ve OR-DR arasında Şekil 2'de verilen hava boşluklarının ortasında (27.2 mm ve 32.4 mm) manyetik akı yoğunluğu değerleri ESA yöntemi ile elde edilmiştir. Çözümlemelerden elde edilen radyal akı yoğunluğu,  $B_r$  değeri, dönme eksenini etrafında  $360^\circ$  boyunca hesaplanmıştır. MD için belirtilen konumlarda mıknatısların oluşturduğu  $B_r$  Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur. İR ve DR için akı yoğunluğunun kutup çifti sayısına bağlı değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Sonuçlar İR'de 3 ve DR'de 13 mıknatıs kutup çiftinin tasarım ile elde edildiğini akı yoğunluğu açısından teyit etmektedir.



Şekil 7. İR ve OR arası  $B_r$  grafiği  
(Plot of the  $B_r$  between the inner and Middle Rotor (MR))



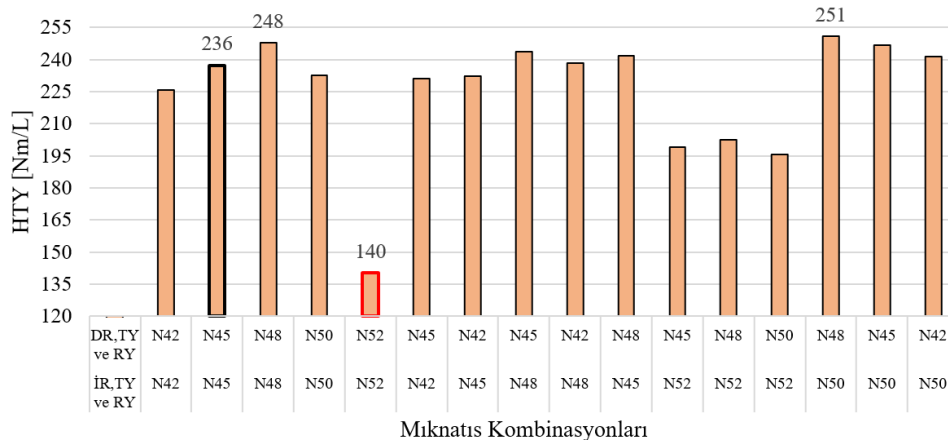
Şekil 8. OR ile DR arası  $B_r$  grafiği  
(Plot of the  $B_r$  between MR and the outer rotor)



Şekil 9. Uzaysal harmonik analiz  
(Spatial harmonic analysis)

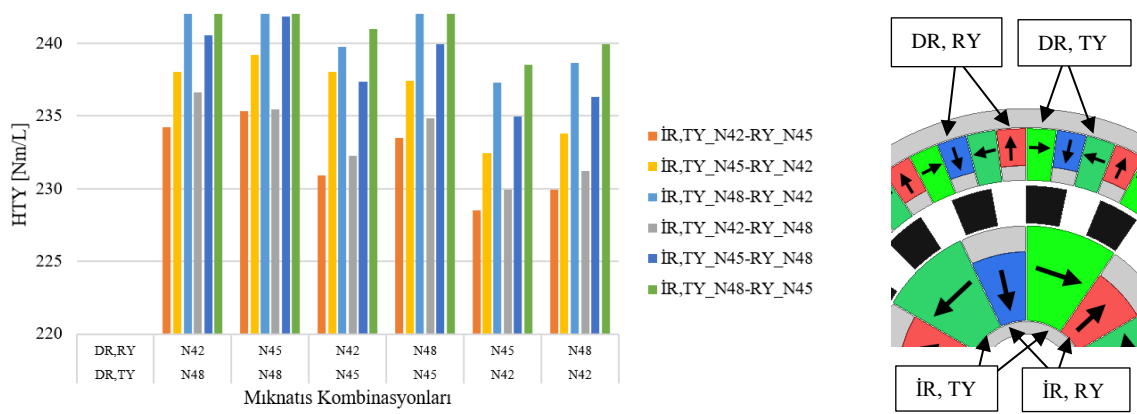
### 3.4. Farklı seviyeli mıknatıs analizi (Different magnet grade analysis)

Çalışmanın bu bölümüne kadar sunulan ESA'da tek tip seviyeli mıknatıs ile elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde farklı seviyelerde mıknatıslar ile farklı kombinasyonlarda elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. MD'de farklı seviyelerde mıknatıslar kullanarak aynı veya daha yüksek HTY elde edilebilmektedir. Öte yandan, yüksek seviyeli mıknatıslar kullanıldığında ortaya çıkan en önemli problemlerden biri, mekanik olarak yapıştırma ile montajlanan mıknatısların dönme hareketi esnasında merkezkaç kuvvetinin etkisiyle bütünlüğünün bozulma ihtimalidir. Bu noktada, mekanik bütünlüğün rahat olduğu durumlarda seviyesi yüksek mıknatıslar ve mekanik bütünlüğü bozulabilecek kısımlarda ise seviyesi düşük mıknatıslar kullanarak hedeflenen performansa ulaşılabilir. AKHD MD, silindirik koordinat düzlemine göre TY ve RY tip manyetize olmuş mıknatıslardan oluşmaktadır. MD İR'de RY ve TY, DR'de RY ve TY olmak üzere 4 çeşit farklı tip mıknatıstan meydana gelmektedir. İR ile DR mıknatısları için N42, N45, N48, N50 ve N52 mıknatıs seviyeli kombinasyonlarda analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre mıknatıs seviyeleri arttıkça çıkış tork değerinden elde edilen HTY değeri doğrusal bir artış göstermemiştir. N42, N45 ve N48 seviyelerinde HTY artış gösterirken, N50 seviyeli mıknatısta düşüş olmuş, ardından N52 seviyeli mıknatıs kullanımında Şekil 10'da kırmızı işaretlenen bölgede gösterildiği gibi HTY ani şekilde azalmıştır. N52 seviyeli mıknatıslar birbirlerini olumsuz etkileyerek manyetik yoğunluklarını azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 10 incelendiğinde en yüksek HTY değeri DR N48, İR N50 kombinasyonunda elde edilmiştir.



Şekil 10. İR ve DR'de farklı mıknatıs tiplerinin HTY'ye etkisi  
(The effect of different magnet types in the outer and inner rotor on VTD)

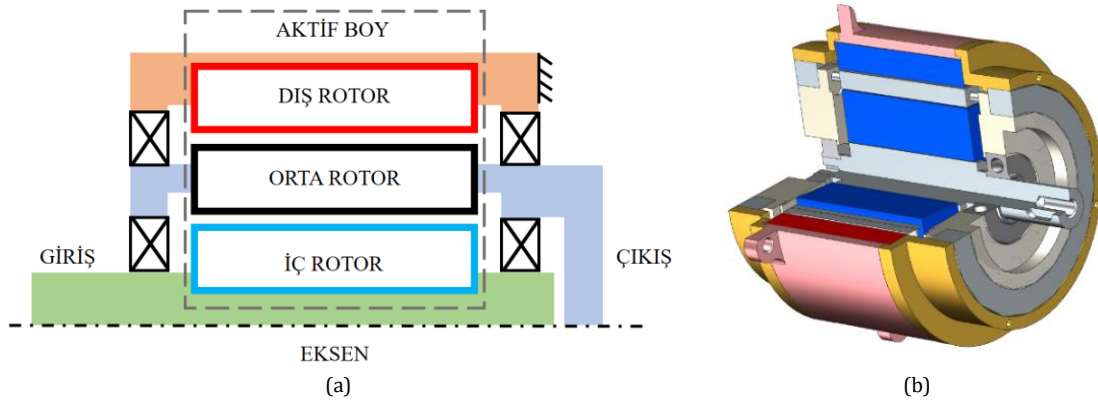
N42, N45 ve N48 mıknatısları MD'ye RY ve TY tipleri olmak üzere 4 farklı kombinasyonda yerleştirilerek ayrıca etkileri incelenmiştir. Bu noktada, İR ve DR için 6 farklı senaryo olmak üzere toplam 36 ayrı senaryo çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 11'de sunulmuştur. Grafikte x eksenini DR-RY ve DR-TY olarak tanımlanan farklı seviyelerdeki mıknatısları, y eksenini ise HTY'yi ifade etmektedir. Farklı renklerde verilen sütunların İR-TY ve İR-RY şeklinde farklı seviyelerde mıknatıslar olarak ifade edilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü üzere DR-TY ve İR-TY bölgelerinde N42 kullanımı HTY'yi azaltmıştır. Ayrıca, İR bölgesinde TY'de seviyesi yüksek mıknatıs kullanımının HTY değerini dikkate değer ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, TY tipi mıknatıslarda yüksek seviyeli, RY tipi mıknatıslarda ise TY mıknatıslara göre bir kademe düşük mıknatıs seviyesi seçilmesi durumunda da benzer HTY değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 11. Mıknatıs kombinasyonlarının HTY'ye etkisi  
(Effect of magnet combinations on VTD)

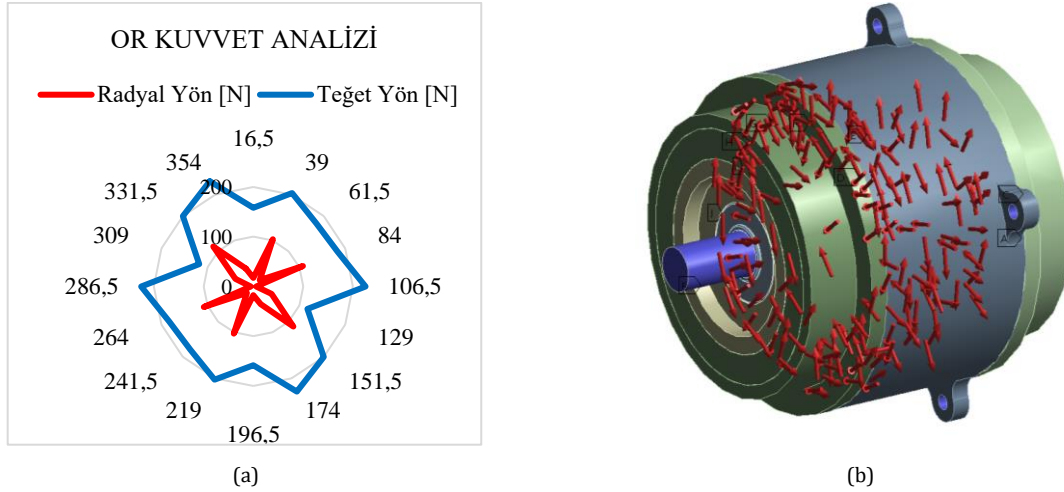
#### 4. Manyetik Dişlinin Yapısal Analizi (Structural Analysis of Magnetic Gear)

MD'nin mekanik çalışma prensibi Şekil 12'de verildiği gibi iç içe dönen millerden oluşmaktadır. MD tasarım çalışmasında DR kısmı kaideye sabitlenerek İR'ye verilecek dönüş hareketi manyetik alanın etkisi ile OR'ye iletilmektedir. Manyetik alanın etkisi ile birbirine güç ve hız aktarımında kayıpları en aza indirebilmek için mümkün olduğunca az parça, basit katı model ve düşük hacme sahip modelin tasarlanması gerekmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi 4 rulman yatağı kullanılarak iç içe dönüş hareketine izin verebilen tasarım elde edilmiştir. Aktif hacme ait olmayan bölgelerde ferromanyetik özelliği az olan malzeme seçilerek HTY'ye olumsuz etkisinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Malzeme seçimi ve uygun kalınlıklar için tork aktarımında oluşan yükler hesaplanarak tasarıma girdi sağlanmıştır.



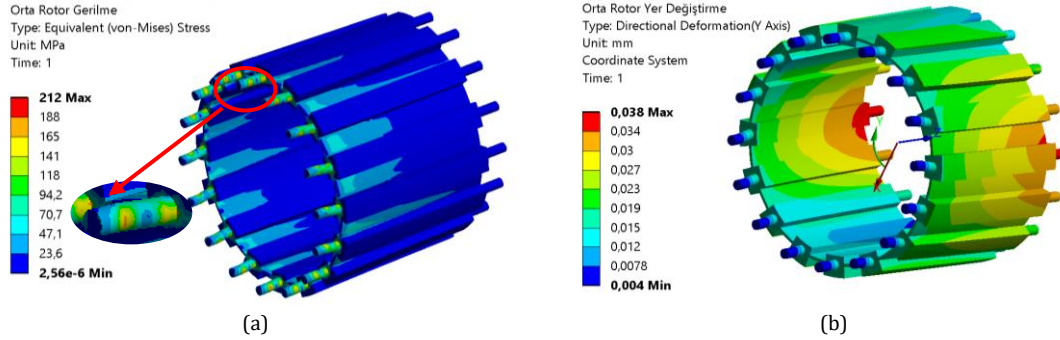
Şekil 12. (a) MD yataklama prensibi (b) 3B modeli  
((a) Bearing principle (b) 3 dimensional model of MG)

Manyetik dişli İR, OR ve DR olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. DR ana kaideye sabitlenerek İR'den verilen giriş tork yükünün elektromanyetik alan altında OR'ye güç aktarılmasıyla çıkış tork yükü oluşmaktadır. Bu yükleri oluşturan her bir mıknatısın oluşturduğu kuvvetlerin RY ve TY bileşenleri elektromanyetik analizler ile hesaplanmıştır. Cidar kalınlığı ve yük oranı karşılaştırıldığında tasarımsal olarak en kritik bileşen OR'dir. Bu noktada, 2B ESA'dan elde edilen OR kuvvet bileşenleri Şekil 13'de gösterilmiştir. En yüksek HTY'nin elde edildiği pozisyon dikkate alınarak sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. MD 2B modelde OR segmentleri arası boşluk vakumlu bölge olarak tanımlanmıştır (Şekil 2). Yapısal analizlerde ise yapısal bütünlüğün sağlanabilmesi için OR'de ince cidarlı destekler tanımlanmıştır. Bu desteklerin HTY'ye etkisi bu analizlerde ihmal edilerek maksimum yükleme durumu analizlerde dikkate alınmıştır. OR'ye gelen TY yükleri tork yükünü oluşturduğu için toplam TY yükü, 2B analizden hesaplanan çıkış torku ile yakınsamıştır.



Şekil 13. (a) MD'nin en yüksek tork pozisyonunda OR kuvvet analizi (b) MD kuvvet gösterimi  
((a) MR force analysis of the highest torque position of MG (b) Force representation of MG)

Yapısal analizlerde Şekil 13'de gösterilen pimlerde hareket kısıtlanıp, Şekil 13'de belirtilen yükler OR'ye uygulanmıştır. Çözüm ağı yakınsama testi yapılarak uygun ağ yapısında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Noktasal yük tanımlamasına bağlı gerilme yığılma durumları göz ardı edildiğinde, analiz sonuçları en yüksek gerilmelerin (140-160 MPa) 3 mm çaplı pimlerin dip bölgelerinde meydana geldiğini göstermiştir. OR malzemesi olarak ferromanyetik özellikli AISI 1008 kullanılmıştır. Bu gerilmeler ilgili malzemenin akma dayanımının oldukça altındadır [28]. Diğer bölgelerde şekilden görüldüğü gibi emniyet faktörünün çok daha yüksek seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 14. (a) OR gerilme ve (b) yer değiştirme sonuçları  
((a) Stress and (b) Displacement results of MR)

## 5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, 5,33 aktarma oranına sahip bir eş eksenli AKHD manyetik dişli, savunma ve havacılık sektörlerinde kullanılması muhtemel KTS uygulamaları kapsamında amaçlanan isterler dikkate alınarak tasarlanmıştır. MD karakteristiğine uygun olan aktarma oranı seçilip, tasarım parametrelerine göre sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 2B ESA ile performansları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle AKHD ile farklı dizilim tipli tasarımların performansları karşılaştırılıp bu yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir. Sonrasında ise AKHD'li tasarımda farklı geometrik parametreler değişken olarak tanımlanıp çeşitli modeller geliştirilerek performans iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. AKHD'li MD parametrik en iyilemesi ile elde edilen HTY değerini %32 artış göstermiştir. Ayrıca, MD tasarım parametreleri ile İR'de %4.6, OR'de %0.67 tork dalgalanması hesaplanmıştır. Tasarımı sonlanan MD'nin akı yoğunluğu incelenmiş ve uzaysal harmonik analizi gerçekleştirilerek baskın kutup çifti teyit edilmiştir. Elde edilen parametrik en iyilenmiş MD modelde farklı mıknatıs seviyelerinin performansa etkisi incelenmiştir. TY tipi mıknatıslarda yüksek seviyeli, RY tip mıknatıslarda ise TY mıknatıslara göre bir kademe düşük mıknatıs seviyesi seçilmesi durumunda benzer HTY sonuçları elde edilmiştir. Ardından MD çalışma prensibi göz önüne alınıp modellenen sisteme etkiyen kuvvetler hesaplanmış ve kritik bileşen olan OR'ye tanımlanarak yapısal davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar yapısal analiz sonuçları en iyilenen MD tasarımının mekanik dayanım

isterlerini hedeflenen tork değerinde sağlayabildiği göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda parametrik olarak belirlenmiş en iyi performanslı MD için OR segmentler arası destek modelinin HTY'ye etkisi incelenecektir. Ayrıca, MD'nin katı model tasarımı detaylandırılarak üretimleri ve bütünlükleri gerçekleştirilecektir. Ardından, deneysel veriler ile elde edilen 2B ve 3B ESA sonuçlar karşılaştırılacaktır. Yine gelecekte, tork dalgalanmasına etki eden faktörler incelenip azaltılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilecektir.

## 6. Simgeler

### Latin Harfleri (Latin Letters)

$n_2$	:	OR, Ferromanyetik segment sayısı
$p_1$	:	İR, Kutup çifti
$p_3$	:	DR, Kutup çifti
$T_1$	:	İR, Tork değeri
$T_2$	:	OR, Tork değeri
$T_3$	:	DR, Tork değeri
$G_{12}$	:	Aktarma oranı
$Ri_1$	:	İR, İç yarıçap
$Ro_1$	:	İR, Dış yarıçap
$Li_{ry}$	:	İR, RY mıknatıs boyu
$Ri_2$	:	OR, İç yarıçap
$Ro_2$	:	OR, Dış yarıçap
$Ri_3$	:	DR, İç yarıçap
$Ro_3$	:	DR, Dış yarıçap
$Lo_{ry}$	:	DR, RY mıknatıs boyu
$Ri$	:	İç yarıçap
$Ro$	:	Dış yarıçap
$l$	:	Aktif aksel boy
$a$	:	Hava aralığı
$Br$	:	Radyal akı yoğunluğu
$T_{dalgalanma}$	:	Tork dalgalanma yüzdesi
$T_{en\ yüksek}$	:	En yüksek tork değeri
$T_{en\ az}$	:	En az tork değeri
$T_{ort}$	:	Ortalama tork değeri

### Yunan Harfleri (Greek Letters)

$\omega_1$	:	İR, Açısal hız
$\omega_2$	:	OR, Açısal hız
$\omega_3$	:	DR, Açısal hız
$\theta_1$	:	İR, Açı
$\theta_2$	:	OR, Açı
$\theta_3$	:	DR, Açı

## Teşekkür (Acknowledgment)

Yazarlar, bu araştırma için gerekli olanak ve kaynakları sağladıkları için TÜBİTAK SAGE ve Hitit Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] M. Keleş and C. Baykasoğlu, "Experimental and Numerical Investigation on the Effect of the Structural Characteristics of a Fin Actuation System on System Performance," *GMBD*, vol. 6, no. 1, Apr. 2020. doi: 10.30855/gmbd.2020.01.04
- [2] S. H. Kim and M.-J. Tahk, "Modeling and Experimental Study on the Dynamic Stiffness of an Electromechanical Actuator," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 53, no. 4, pp. 708–719, Jul. 2016. doi: 10.2514/1.A33483
- [3] E. Daş, İ. İ. Delice, and M. Keleş, "Analysis and robust position control of an electromechanical control actuation system," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 3, pp. 628–640, Feb. 2020. doi: 10.1177/0142331218813421
- [4] Ö. Hastürk, "A novel electromechanical actuator for missile jet vane thrust control," in *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2015. pp. 1298–1302.
- [5] C.-H. Yoo, "Active Control of Aeroelastic Vibrations for Electromechanical Missile Fin Actuation Systems," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 40, no. 12, pp. 3299–3306, Dec. 2017. doi: 10.2514/1.G002821
- [6] Ö. Hastürk, "Applications of slider chain inversion in control actuation systems," in *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2016. pp. 1579–1584.
- [7] M. Keleş and C. Baykasoğlu, "Manyetik dişli tasarımında orta rotor segment destek parametrelerinin performansa etkilerinin incelenmesi," in *25. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Konya*, 14 Eylül 2024, pp. 371–375.
- [8] P. M. Tlali, R.-J. Wang, and S. Gerber, "Magnetic gear technologies: A review," in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany: IEEE, Sep. 2014. pp. 544–550. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960233
- [9] J. J. Scheidler, "NASA's Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion," in *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, Cincinnati, Ohio: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Jul. 2018. doi: 10.2514/6.2018-4988
- [10] Y. Wang, M. Filippini, N. Bianchi, and P. Alotto, "A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 55, no. 5, pp. 4557–4566, Sep. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2916765
- [11] C. G. C. Neves and A. F. F. Filho, "Magnetic Gearing Electromagnetic Concepts," *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 108–119, Mar. 2017. doi: 10.1590/2179-10742017v16i1874
- [12] K. Li, S. Modaresahmadi, W. B. Williams, J. D. Wright, D. Som, and J. Z. Bird, "Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 55, no. 4, pp. 3522–3533, Jul. 2019. doi: 10.1109/TIA.2019.2905838
- [13] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, J. Wright, J. Pritchard, M. Calvin, and W. Williams, "A Magnetic Gearbox with an Active Region Torque Density of 239Nm/L," *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 54, no. 2, pp. 1331-1338, 2017. doi: 10.1109/TIA.2017.2779418
- [14] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, Jul. 2001. doi: 10.1109/20.951324
- [15] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, p. 135, 2004. doi: 10.1049/ip-epa:20040224
- [16] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a High-Performance Magnetic Gear," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 3, pp. 764–770, May 2005. doi: 10.1109/TIA.2005.847319
- [17] B. Praslicka, M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, "Review and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Pole Pair Count Selection Effects," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, pp. 1–1, 2021. doi: 10.1109/JESTPE.2021.3053544
- [18] K. Li and J. Z. Bird, "A Review of the Volumetric Torque Density of Rotary Magnetic Gear Designs," in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli: IEEE, Sep. 2018. pp. 2016–2022. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8507059
- [19] S. Modaresahmadi, D. Barnett, H. Baninajar, J. Z. Bird, and W. B. Williams, "Structural modeling and validation of laminated stacks in magnetic gearing applications," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 192, p. 106133, Feb. 2021. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106133
- [20] S. Modaresahmadi, C. Nichols, and W. Williams, "Mechanical Design of Magnetic Gearboxes Optimized for Assembly," in *Volume 6A: Energy, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers*, Nov. 2018. p. V06AT08A012. doi: 10.1115/IMECE2018-86878



- [21] D. Som et al., "Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–6, Nov. 2017. doi: 10.1109/TMAG.2017.2715799
- [22] M. Keleş and C. Baykasoglu, "Bir Manyetik Dişli Tasarımının Analizi ve Performans En İyileştirilmesi," in *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, 26 Kasım 2022.
- [23] H. Baninajar, S. Modaresahmadi, H. Y. Wong, J. Bird, W. Williams, and B. Dechant, "Designing a Halbach Rotor Magnetic Gear for a Marine Hydrokinetic Generator," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 58, no. 5, pp. 6069–6080, Sep. 2022. doi: 10.1109/TIA.2022.3180705
- [24] T. Tallerico, Z. A. Cameron, and J. J. Scheidler, "Design of a Magnetic Gear for NASA's Vertical Lift Quadrotor Concept Vehicle," in *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN*: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2019. doi: 10.2514/6.2019-4477
- [25] J.-I. Lee et al., "Design and Analysis of the Coaxial Magnetic Gear Considering the Electromagnetic Performance and Mechanical Stress," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–5, Jun. 2020. doi: 10.1109/TASC.2020.2968267
- [26] H. Y. Wong, H. Baninajar, B. Dechant, and J. Bird, "Designing a Magnetic Gear for an Electric Aircraft Drivetrain," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA*: IEEE, Oct. 2020. pp. 1–6. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235977
- [27] Y. Kassab, A. Ghanem, and E. Gouda, "Analysis of a coaxial magnetic gear optimally designed using Particle Swarm Optimization," *Mansoura Engineering Journal*, vol. 49, no. 4, Jan. 2024. doi: 10.58491/2735-4202.3206
- [28] A. Aytaç, M. S. Işık, B. Çanakçı, T. Özdemir, K. Aztekin, and H. İpek, "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi," *Savunma Bilimleri Dergisi*, vol. 17, no. 2, pp. 139–165, Nov. 2018. doi: 10.17134/khosbd.477252

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## An Empirical Analysis of Stock Price Prediction Using Deep Learning Methods: LSTM, GRU, GAN, and WGAN-GP

Cemal Öztürk<sup>a</sup>, Abdulkadir Karacı<sup>b</sup>

Submitted: 09.03.2024 Revised: 25.08.2024 Accepted: 19.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR03

### ABSTRACT

**Keywords:** Deep learning, LSTM, GRU, GAN, WGAN-GP, stock price prediction

<sup>a</sup>Pamukkale University,  
Faculty of Economics and  
Administrative Sciences,  
Department of Economics  
20150 - Denizli Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3850-7416  
e-mail: cemalo@pau.edu.tr

<sup>b</sup>Samsun University,  
Faculty of Engineering,  
Department of Software Engineering  
55420 - Samsun, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-2430-1372  
e-mail:  
abdulkadir.karaci@samsun.edu.tr

\*Corresponding author:  
cemalo@pau.edu.tr

Financial markets are important due to dynamic economic conditions and global interactions. This study compares deep learning methods for stock price prediction, including LSTM, GRU, GAN, and WGAN-GP. Using Google stock data, model performance was assessed via RMSE, MAE, and  $R^2$  metrics. The LSTM model achieved the best performance with the lowest error and highest accuracy, scoring an RMSE of 4.214, MAE of 3.387, and  $R^2$  of 0.9509. The GAN model also delivered strong results, with an RMSE of 4.048, MAE of 3.288, and  $R^2$  of 0.9578 on test data. In contrast, the GRU model performed slightly worse, with an RMSE of 4.303, MAE of 3.42, and  $R^2$  of 0.9490. The WGAN-GP model showed the poorest performance, with an RMSE of 11.523, MAE of 9.015, and  $R^2$  of 0.2452. Unexpected events like the COVID-19 pandemic led to significant deviations in predictions. In conclusion, LSTM and GAN models have proven effective for short- and medium-term forecasting.

## Derin Öğrenme Yöntemleri Kullanılarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini Üzerine Ampirik Bir Analiz: LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP

### ÖZ

Finansal piyasalar, değişen ekonomik koşullar ve küresel etkileşimler nedeniyle büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışma, hisse senedi fiyatlarını tahmin etmek için LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP gibi derin öğrenme yöntemlerini karşılaştırmıştır. Google hisse senedi verileri kullanılarak yapılan analizde, modellerin performansı RMSE, MAE ve  $R^2$  metrikleriyle değerlendirilmiştir. LSTM modeli, en düşük hata oranı ve en yüksek doğruluk ile en iyi performansı göstermiştir; RMSE değeri 4.214, MAE değeri 3.387 ve  $R^2$  değeri 0.9509'dur. GAN modeli de güçlü performansı ile dikkat çekmiştir; test verisinde RMSE değeri 4.048, MAE değeri 3.288 ve  $R^2$  değeri 0.9578 olarak bulunmuştur. GRU modeli, LSTM ve GAN'a kıyasla daha düşük doğruluk sergilemiştir; RMSE değeri 4.303, MAE değeri 3.42 ve  $R^2$  değeri 0.9490'dur. WGAN-GP modeli ise diğer modellere göre en yüksek hata oranını ve en düşük doğruluğu göstermiştir; RMSE 11.523, MAE 9.015 ve  $R^2$  0.2452'dir. Ayrıca, COVID-19 gibi beklenmedik olaylar tahminlerde belirgin sapmalara yol açmıştır. Sonuçlar, LSTM ve GAN modellerinin kısa ve orta vadeli tahminlerde başarılı olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin öğrenme, LSTM, GRU, GAN, WGAN-GP, hisse senedi fiyat tahmini



## 1. Giriş (Introduction)

Hisse senedi fiyatı tahmini, yatırımcılar için hisse senedi fiyatlarının muhtemel yönü hakkında değerli bilgiler sağlayan önemli bir araçtır ve uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Hisse senedi fiyatları, iç ve dış ekonomik ortam, uluslararası durum, sektör beklentisi, borsaya kote şirketlerin finansal verileri ve borsa işleyişi gibi çeşitli iç ve dış faktörlerden etkilenmektedir. Hisse senedi fiyatlarının tahmin edilmesi, yatırımcılar, portföy yöneticileri ve politika yapımcılar için büyük önem taşımaktadır. Doğru tahminler, karar verme süreçlerini iyileştirerek ve finansal riskleri azaltarak piyasa katılımcılarının başarısını artırabilir.

Zaman serisi tahmin problemlerini çözmek için kullanılan teknikler ikiye ayrılabilir. İlk kategori, klasik ekonometrik modellerdir. Yaygın yöntemler, otoregresif yöntem (AR), hareketli ortalama modeli (MA), otoregresif hareketli ortalama modeli (ARMA) ve otoregresif bütünleşik hareketli ortalamadır (ARIMA) [1-3]. Bu modeller her yeni sinyali, son birkaç sinyalin ve bağımsız gürültü terimlerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak ele almaktadır. Ancak, finansal verilerin karmaşıklığı ve doğrusal olmayan yapısı nedeniyle bu modellerin performansı sınırlı kalmaktadır [4].

İkinci kategori, yapay zeka temelli yöntemlerdir. Bu teknikler arasında yapay sinir ağları (ANN) [5], destek vektör makineleri (SVM) [6], k-en yakın komşu (k-NN) [7], lojistik regresyon (LR) [8] gibi yöntemler yer almaktadır. Derin öğrenme, YSA (Yapay Sinir Ağları)'nın daha gelişmiş bir versiyonu olup, daha fazla katman ve nöron içeren derin sinir ağları (Deep Neural Networks) kullanır. Derin öğrenme, özellikle büyük veri kümeleri ve karmaşık veri yapıları ile çalışırken üstün performans göstermektedirler. Derin sinir ağları, verilerden soyut özellikler çıkarma yeteneği ile zaman serisi tahmin problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP derin öğrenme yöntemlerinin hisse senedi fiyatlarını tahmin etmedeki etkinliğini ve performansını değerlendirmektir. Derin öğrenme modelleri, özellikle uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme konularında geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılıdır. Bu nedenle, bu çalışmada derin öğrenme modelleri kullanılmış ve bu modellerin hisse senedi fiyat tahmini üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde ilgili literatür taraması sunulmuştur. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılacak veri ve yöntem tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, önerilen model ile deneysel analiz ve elde edilen sonuçların klasik tahmin modellerinin verdiği sonuçlarla karşılaştırması sunulmuştur. Beşinci bölümde sonuçlar ve öneriler tartışılmaktadır.

## 2. Literatür Araştırması (Literature)

Derin öğrenme yöntemlerinin finansal piyasalarda giderek daha fazla önem kazandığı günümüzde, hisse senedi fiyatlarının doğru tahmin edilmesi yatırımcılar ve finansal kurumlar için büyük öneme sahiptir. Hisse senedi fiyatlarının tahmin edilmesi, geleneksel finans teorilerine ve istatistiksel modellere dayanarak yapılmaktadır; fakat son yıllarda, derin öğrenme teknikleri bu alanda önemli ölçüde ilerlemeler kaydetmiştir. Bu bölümde, hisse senedi fiyat tahmini için kullanılan derin öğrenme yöntemleri üzerine yapılmış literatür çalışmaları incelenmektedir.

Madge ve Bhatt (2015), 34 adet teknoloji hissesi ile SVM'yi kullanarak belirli bir hisse senedinin davranışını tahmin etmeyi amaçlamıştır [9]. Çalışma, kısa vadeli tahminlerin çok düşük doğruluğa sahip olduğu, ancak uzun vadeli tahminlerin %55-60 arasında bir doğruluğa ulaştığı sonucuna varmaktadır. Bu tahmin doğruluğu, EMH'nin uzun vadeli tahmin için mutlaka geçerli olmadığını göstermektedir. Bu sonuç, makine öğrenmesi algoritmalarının hisse senedi fiyatlarını veya hisse senedi fiyat hareketini tahmin etmek için çeşitli borsa teknik göstergelerinin etkisini kullanabileceğini göstermektedir.

Khare ve diğ. (2017), New York Menkul Kıymetler Borsasında kayıtlı 10 hisse senedini dikkate almış ve teknik analizin gücünden yararlanarak bu kısa vadeli fiyatların tahminine odaklanmıştır [10]. Makale, ANN'nin iki farklı türü olan İleri Beslemeli Sinir Ağları (FNN) ve Tekrarlayan Sinir Ağlarını (RNN) dikkate almıştır. FNN'nin bir hisse senedinin kısa vadeli fiyatlarını tahmin etmede LSTM'den daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Selvin ve diğ. (2017), LSTM, RNN ve Evrişimli Sinir Ağları (CNN) gibi derin öğrenme modelleri kullanılarak hisse senedi fiyatları tahmini incelenmektedir [11]. Makalede, ayrıca kayan pencere yöntemi kullanılarak verilerin hazırlanması da ele alınmaktadır.

Ji ve diğ. (2019), karbon vadeli fiyatını tahmin etmek için bir ARIMA-CNN-LSTM modelini tanıtmıştır [12]. ARIMA-CNN-LSTM modeli, ARIMA modelini ve doğrusal ve doğrusal olmayan veri özelliklerini yakalamak için CNN ve LSTM katmanlarını birleştiren derin sinir ağı yapısını kullanmaktadır. ARIMA-CNN-LSTM model yapısında, doğrusal özellikleri yakalamak için ARIMA kullanılmıştır. CNN, hiyerarşik veri yapısını yakalamak için kullanılırken, LSTM, verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalamak için kullanılmaktadır. Kapsamlı performans değerlendirmesi, haftalık karbon vadeli fiyatları kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, ARIMA-CNN-LSTM modelinin, Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) performans ölçümleri açısından kıyaslama modellerinden daha iyi tahmin doğruluğu sağlayabildiğini doğrulamıştır.

Alberto ve Romero (2019), GAN ve LSTM modellerinin etkinliğini inceledikleri çalışmalarında örnekleme döneminden bir gün sonra fiyatın yükselip yükselmeyeceğini belirlemeyi amaçlamışlardır [13]. LSTM üretici, CNN ayırıcı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak GAN ve LSTM modelleri arasında önemli bir fark bulunamamıştır.

Zhang ve diğ. (2019), hisse senedinin kapanış fiyatını tahmin etmek için üretici olarak LSTM ve ayırıcı olarak Çok Katmanlı Perceptron (MLP) ile bir GAN modeli önermiş ve sonucu LSTM modeli ile karşılaştırmıştır [14]. Sonuçlar, GAN'ın geleneksel referans modelinden daha verimli olduğunu göstermiştir. GAN modelinin doğruluğu yaklaşık %75.54 iken LSTM % 68.59'dur.

Raço ve Demirci (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, BIST 30 endeks fiyatlarını tahmin etmek için derin öğrenme modeli önerilmiştir. Bu çalışma, teknik göstergeler ve osilatörler kullanarak tahminler yapmış ve diğer benzer önerilerden daha iyi performans göstermiştir. Çalışma, 27 aylık veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir ve modelin ortalama kare hata (MSE) değerleri, BIST 30 endeks fiyatlarının beş işlem günü sonrası tahminlerinde oldukça düşük bulunmuştur [15].

Ta ve diğ. (2020), geçmiş verilere dayalı stok hareketini tahmin etmek için özel bir RNN türü olan uzun bir kısa süreli bellek (LSTM) ağı önermiş, portföy performansını iyileştirmek için eşit ağırlıklı modelleme (EQ), simülasyon modelleme Monte Carlo simülasyonu (MCS) ve optimizasyon modelleme ortalama değişken optimizasyonu (MVO) dahil olmak üzere çoklu portföy optimizasyon teknikleri kullanmıştır [16]. Önerilen LSTM tahmin modelin stok tahmininden yüksek doğruluk elde ederek verimli çalıştığını göstermiştir. LSTM tahmin modeline dayalı olarak oluşturulan portföyler, doğrusal regresyon ve SVM gibi diğer oluşturulmuş portföylere dayalı tahmin modellerinden daha iyi performans göstermiştir.

Lu ve diğ. (2020), uzun kısa süreli hafızaya (LSTM) dayalı olarak, CNN-LSTM'ye dayalı bir hisse senedi fiyatı tahmin yöntemi önermiştir [17]. Ayrıca, hisse senedi fiyatını tahmin etmek için MLP, CNN, RNN, LSTM, CNN-RNN ve diğer tahmin modelleri kullanılmış ve bu modellerin tahmin sonuçları analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan veriler 1 Temmuz 1991 - 31 Ağustos 2020 tarihleri arasındaki 7127 işlem günü dahil olmak üzere günlük hisse senedi fiyatlarını içermektedir. Sonuçlara göre, CNN-LSTM en yüksek tahmin doğruluğu ile güvenilir bir hisse senedi fiyatı tahminini vermiştir.

Yang ve diğ. (2020) özellik çıkarımı için bir CNN ile tahmin için bir LSTM ağını birleştirerek, finansal zaman serilerindeki tarihsel bilgilere dayalı olarak fiyat hareketi yönünü tahmin etmek için derin bir öğrenme çerçevesi sunmuştur [18]. Deneysel sonuçlar, çerçevenin hisse senedi fiyatı hareket yönünü tahmin etmede son teknoloji modellerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

Chandra ve diğ. (2021), COVID-19 salgını öncesinde ve sırasında hisse senedi fiyatı tahmini için Bayes sinir ağlarını kullanmıştır [19]. Ayrıca, COVID-19 öncesi veri setlerinin, COVID-19 sırasında hisse senedi fiyatlarının tahmin edilmesine yardımcı olup olmadığını da araştırmışlardır. COVID-19 sırasında hisse senedi fiyatındaki yüksek oynaklık nedeniyle tahmin sağlamanın daha zor olduğunu gösterirken Bayesyen sinir ağlarının, COVID-19 salgınının ilk zirvesi sırasında yüksek piyasa oynaklığına rağmen belirsizlik ölçümü ile makul tahminler sağlayabildiğini bulmuşlardır.

Demirel vd. (2021), çok katmanlı algılayıcılar (MLP), destek vektör makineleri (SVM) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) modelleri kullanarak Borsa İstanbul Ulusal 100 Endeksi'ndeki (BIST100) hisse senedi fiyatlarını tahmin etmeyi amaçlamıştır [20]. Araştırmacılar, 2010'dan 2019'a kadar olan 9 yıllık BIST100 tarihsel verilerini kullanarak tahmin performanslarını hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE), ortalama kare hata (MSE) ve R-kare (R<sup>2</sup>) metrikleri yardımıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmanın bulguları, MLP modelinin açılış hisse senedi fiyatlarını tahmin etmede SVM ve LSTM modellerine göre daha iyi olduğunu ve LSTM modelinin kapanış hisse senedi fiyatlarını tahmin etmede SVM ve MLP modellerine göre daha iyi olduğunu göstermiştir.

Jing ve diğ. (2021), hisse senedi fiyat eşzamanlılığı teorisini hisse senedi fiyat trend analizinde uygulayan, stok kümeleri oluşturmak için yakınlık yayılma algoritmasını ve mekansal veri analizi yeteneği sağlamak için CNN modelini kullanan, hisse senedi fiyat eşzamanlılığı ve derin öğrenme yöntemlerine dayalı bir hisse senedi fiyatı tahmin modeli önermiştir [21].

Yan ve diğ. (2021), LSTM derin sinir ağına dayalı ve BP sinir ağı, geleneksel RNN ve geliştirilmiş LSTM derin sinir ağı ile karşılaştırılan yüksek hassasiyetli kısa vadeli bir finansal piyasa zaman serisi tahmin modeli oluşturmuştur [22]. Sonuçlar, LSTM derin sinir ağının yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğunu ve hisse senedi piyasasının zaman serilerini etkili bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir.

Lin ve diğ. (2021), üretici olarak Geçitli Tekrarlayan Birimler (GRU) ve ayrımcı olarak CNN ile GAN kullanan bir hisse senedi tahmin modeli önermiştir [23]. Hedef fiyat olarak Apple hisse senedi kapanış fiyatını kullanmıştır. Önerilen GAN modeli sonuçlarını temel modellerle karşılaştırmışlardır. Buna göre temel GAN ve WGAN-GP geleneksel modeller olan GRU ve LSTM'den daha iyi performans göstermiştir. Giang ve diğ. (2022), hisse senedi fiyatındaki önemli değişimin analizine dayalı olarak LSTM modelinin tahmin aşamasında dinamik bir kayan pencere uygulamıştır [24]. Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Vietnam'ın üç hisse senedi veri seti üzerindeki deneysel sonuçlar, modelin hisse senedi fiyat dalgalanmalarının eğilimini tahmin etmede rakiplerinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

Han ve diğ. (2022), finansal varlık fiyatlarının simülasyonunu gerçekleştirmek için Wasserstein Generative Adversarial Network (WGAN) kullanımını incelemektedir [25]. Bu yaklaşım, hisse senetleri, vadeli işlemler ve kripto paralar gibi farklı varlık sınıflarının fiyatlarını modellemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın bulguları, WGAN'nın farklı varlık sınıfları arasındaki bağımlılık yapısını ve fiyat hareketlerini başarıyla yakaladığını göstermektedir. Bu yaklaşım, piyasa riskini ve portföy yönetimi için önemli olan fiyat hareketlerini modellemek ve tahmin etmek amacıyla kullanılabilir.

Liu ve diğ. (2022), CAE ve LSTM sinir ağını birleştiren, CAE'yi hisse senedi fiyat görüntü özellik verilerini çıkarmak için kullanan ve kısa vadeli hisse senedi fiyatlarını tahmin etmek için teknik verileri birleştiren bir model önermiştir [26].

Albayrak ve Saran (2023), ARIMA modelini temel alarak, üç farklı tekrarlayan sinir ağı modeli (LSTM, GRU, dikkat katmanlı LSTM) ile karşılaştırmalar yapmıştır. Bu çalışma, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, Borsa İstanbul verileri üzerinde gün içi tahminler yaparken, 28 farklı finansal indikatör kullanarak, derin öğrenme modellerinin performansını değerlendirmiştir. Sonuçlar, ARIMA modelinin, doğrusal olmayan RNN modellerine kıyasla daha yüksek ortalama hata oranına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle GRU modeli, diğer modellere göre daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmanın bulguları, derin öğrenme modellerinin, geleneksel istatistiksel yöntemlere göre finansal zaman serilerinin tahmininde daha etkili olabileceğini vurgulamaktadır [27].

Çoban ve Hayat (2023), derin öğrenme teknikleri kullanılarak hisse senedi fiyatlarının tahmini üzerine odaklanmış ve özellikle Derin Sinir Ağları (DNN), Evrimsel Sinir Ağları (CNN) ve Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) modelleri karşılaştırmıştır. Çalışma, Borsa İstanbul'da işlem gören Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin 2013-2021 yılları arasındaki günlük kapanış fiyatlarını kullanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, CNN modelinin diğer modellere göre daha düşük hata oranına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, literatürde CNN'nin finansal zaman serilerinde güçlü bir tahmin aracı olarak kullanılabilirliğini destekleyen diğer araştırmalarla uyum içerisindedir [28].

Dalkıran ve Ozan (2022), Borsa İstanbul'da işlem gören hisse senetlerinin fiyatlarını tahmin etmek için

derin öğrenme tekniklerini kullanmışlardır. Çalışmada, LSTM ve GRU algoritmaları Adam ve RMSProp optimize edicileri ile kullanılmış ve performansları değerlendirilmiştir. ISCTR hisse senedi verileri üzerine yapılan günlük değer tahminlerinde, VAKBN, GARAN, QNBFB ve AKBNK hisse senetleri ile USD/TRY, BIST30 ve BANKX endekslerinin tarihsel verileri de modelin tahmin performansını artırmak amacıyla dahil edilmiştir. Bu çalışma, özellikle Borsa İstanbul gibi volatilitesi yüksek piyasalarda derin öğrenme algoritmalarının etkinliğini vurgulamakta ve bu alandaki diğer araştırmalar için önemli bir referans teşkil etmektedir [29].

Erdin (2023), Borsa İstanbul endeksinde işlem gören EREGL hisse senedi verilerini kullanarak, ARIMA ve derin öğrenme modellerinin tahmin performanslarını kıyaslamıştır. Çalışmada, ARIMA modeli ile derin öğrenme algoritmalarından LSTM, GRU ve RNN modelleri arasında performans karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen bulgular, RNN algoritmasının diğer yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergilediğini ve ortalama %93 doğruluk oranı ile test veri seti üzerinde en başarılı sonuçları verdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, özellikle finansal zaman serilerinin modellenmesinde derin öğrenme yöntemlerinin etkinliğini vurgulamakta ve geleneksel ARIMA modelleri ile karşılaştırmalı analizler sunmaktadır [30].

Bu çalışmada, literatürdeki bu sınırlılıkları aşmak için çeşitli yenilikçi yaklaşımlar benimsenmiştir. Öncelikle, Google hisse senedi fiyatları üzerine geniş bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, modelin performansını daha güvenilir ve genellenebilir kılmaktadır. Çalışmamızda LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP gibi ileri seviye derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Bu modeller, finansal zaman serilerinin karmaşıklığını ve dinamiklerini daha iyi yakalayabilmektedir. Modellerin performansını maksimize etmek için detaylı bir hiper parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu, modellerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmakta ve gerçek dünya uygulamalarında daha iyi performans göstermelerini sağlamaktadır. Çalışmamız ayrıca, farklı modellerin performanslarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve her bir modelin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemiştir. Bu, hangi modelin hangi senaryolarda daha etkili olduğunu anlamamıza olanak tanımıştır.

Bununla birlikte, çalışmamızın bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. İlk olarak, sadece Google hisse senedi fiyatları üzerine odaklanılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda farklı hisse senetleri ve finansal enstrümanlar üzerinde de testler yapılarak modelin genellenebilirliği artırılabilir. İkinci olarak, modellerin gerçek zamanlı piyasa koşullarında nasıl performans gösterdiği kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Gerçek zamanlı testler, modelin pratikteki uygulanabilirliğini daha iyi değerlendirmemizi sağlayacaktır. Son olarak, veri ön işleme ve özellik mühendisliği süreçleri daha da geliştirilebilir. Ek özelliklerin eklenmesi ve daha gelişmiş veri ön işleme tekniklerinin kullanılması, modelin performansını artırabilir.

### 3. Veri ve Metodoloji (Data and Methodology)

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi alanında, son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemelerin temelinde, özellikle yapay sinir ağları ve derin öğrenme gibi güçlü yöntemler ve algoritmalar bulunmaktadır. Bu bölümde, önce yapay sinir ağlarının temel mantığı ve çalışma prensipleri incelenecektir. Ardından, derin öğrenme kavramına ve bu alandaki önemli yöntemlere, yani RNN (Recurrent Neural Networks), LSTM (Long Short-Term Memory), GRU (Gated Recurrent Units) gibi tekrarlayan sinir ağlarına ve GAN (Generative Adversarial Networks) ve WGAN (Wasserstein Generative Adversarial Networks) gibi üretici modellere değineceğiz. Bu yöntemlerin her biri, makine öğrenmesi ve yapay zekâ alanında çeşitli problemlere çözüm sunarak önemli başarılar elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu bölümde sunulan kavramsal çerçeve, bu yöntemlerin temel prensiplerini ve uygulama alanlarının anlaşılmasına yardımcı olacak ve bu sayede daha derinlemesine çalışmalara zemin hazırlayacaktır.

Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir ağlarının birbirine bağlı yapılarını taklit eden hesaplama sistemleridir [31]. Bu ağlar, bilgi işlemek için belirli bir şekilde birbirine bağlanan nöron adı verilen basit işlem birimlerinden oluşur. Bir YSA tipik olarak girdi, gizli ve çıktı katmanlarını içerir ve her katman yapay nöronlar içerir [32]. YSA'ların temel amacı, zaman içinde çıktı doğruluğunu artırmak için öğrenme kurallarına dayalı olarak sürekli olarak çevreden veri toplama ve çıktı doğruluğunu artırmak için ağırlıklar gibi parametreleri optimize etmektir [33].

YSA, temel prensipleriyle birlikte oldukça güçlü ve esnek modeller sunmaktadır. Ancak, karmaşık ve

büyük veri kümeleri ile başa çıkmada ve daha yüksek performans elde etmede bazı sınırlamaları vardır. Derin öğrenme, YSA'nın daha gelişmiş bir versiyonu olup, daha fazla katman ve nöron içeren derin sinir ağları kullanmaktadır. Derin öğrenme, yapay zekâ (AI) alanında önemli gelişmelere yol açan ve özellikle büyük veri kümeleri üzerinde çalışabilen öğrenme algoritmalarına odaklanan bir yöntemdir [34]. Çok katmanlı yapıları sayesinde veriden daha fazla özellik çıkarılabilir ve daha sofistike öğrenme süreçlerini gerçekleştirebilir. Derin öğrenme, özellikle görüntü ve ses işleme, doğal dil işleme ve oyun oynama gibi alanlarda başarılı uygulamalarıyla öne çıkmaktadır [35].

Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak karmaşık veri yapılarını ve özelliklerini öğrenmeye dayanır [36]. Bu sinir ağları, geri yayılım (backpropagation) ve gradyan inişi (gradient descent) gibi öğrenme algoritmaları kullanarak eğitilmektedir [37].

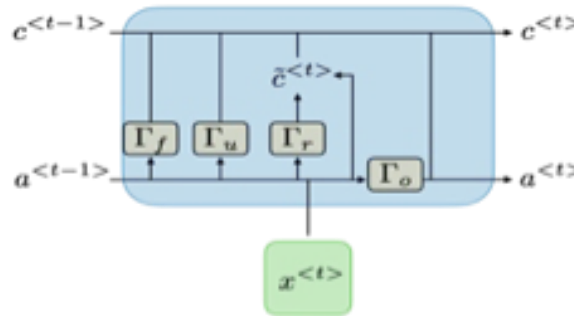
Derin öğrenme kavramının kullanımının son yıllarda yaygınlaşmasının nedeni, geçmiş yıllarda derin mimarileri eğitmek için işlemci gücü olmaması ve yeterli miktarda veri bulunmamasıdır. Günümüzde, işlemci gücünün artması ve birçok alanda sayısallaştırma ile oluşturulan verilerin muazzam boyutlara ulaşmasıyla derin öğrenmenin gelişimi için gerekli altyapı sağlanmıştır. Bu gelişmeler, derin öğrenmenin bilgisayarlı görü, metin işleme, çeviri, zaman serisi tahmini gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Derin öğrenme algoritmalarını uygulamak için kullanılan popüler açık kaynaklı kütüphaneler ve araçlar bulunmaktadır. Bunlar arasında TensorFlow [38], Keras [39], PyTorch [40] ve Caffe [41] gibi yaygın olarak kullanılan kütüphaneler yer almaktadır.

Derin öğrenme, yapay zekâ alanında devam eden önemli gelişmelere katkı sağlamaktadır. Gelecekte, derin öğrenmenin daha fazla uygulama alanı keşfedilecektir ve mevcut tekniklerin sınırlarını aşmak için yeni yöntemler ve algoritmalar geliştirilmektedir [34].

### 3.1. LSTM (Long short-term memory)

LSTM, Schmidhuber ve diğerleri tarafından önerilen bir ağ modelidir [42]. LSTM, RNN'deki gradyan patlaması ve gradyan kaybolması problemlerini çözmek için tasarlanmış bir ağ modelidir [16]. Standart bir RNN'de yalnızca bir tekrar eden modül vardır ve iç yapısı basittir. Bununla birlikte, LSTM modüllerinden dördü standart RNN modüllerine benzer ve etkileşimli bir şekilde çalışmaktadırlar [43,44].



Şekil 1. LSTM mimarisi [45]  
(LSTM architecture)

LSTM yapısında, geçmiş ve gelecek bilgileri anlamlandıran öznelilikler yinelemeli olarak taşınır. Şekil 1, bir LSTM yapısını göstermektedir. Bu modelde aktivasyon fonksiyonu üç farklı noktada kullanılmaktadır: giriş, geri çağırma/unutma ve çıkış. Giriş ve çıkış katmanlarında, genellikle hiperbolik tanjant fonksiyonu tanh seçilirken hatırla/unutma kapılarında sigmoid fonksiyonu kullanılır.

$\hat{a}^{(t)}$  belleği ifade ederken  $\hat{c}^{(t)}$ , bellek için aday değeri sembolize etmektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant kullanılmaktadır. Burada aday değeri şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{c}^{(t)} = \tanh(W_c[\Gamma_r * a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_c), \quad (1)$$

Ayrıca, güncelleme ve ilgi düzeyi kapısı değerleri LSTM'de hesaplanmaktadır. Bu değerler için



aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid kullanılır. Güncelleme ağ kapısı  $\Gamma_u$  ve ilgi düzeyi kapısı  $\Gamma_r$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Gamma_u = \sigma(W_u[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_u), \quad (2)$$

$$\Gamma_r = \sigma(W_r[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_r). \quad (3)$$

Bu yapının geçitlenmiş tekrarlayan birimlerden (GRU) en önemli farkı, ilgi kapısının unutma ( $\Gamma_f$ ) ve çıkış kapısı ( $\Gamma_o$ ) olmak üzere iki yeni denklemlerle elde edilen LSTM yapısında uzmanlaşmış olmasıdır. Unutma kapısı sayesinde geçmişten aktarılan ancak zorunlu olmayan bilgilerin ağırlığı azaltılır.

Güncelleme geçişi ve unutma etkisi ile daha etkin bir çıktı üretilir [42].

$$\Gamma_f = \sigma(W_f[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_f), \quad (4)$$

$$\Gamma_o = \sigma(W_o[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_o). \quad (5)$$

Eş. (1), (2) ve (4) kullanılarak, yeni  $\hat{c}^{(t)}$  değeri şu şekilde elde edilebilir:

$$c^{(t)} = \Gamma_u * \hat{c}^{(t)} + \Gamma_f * \hat{c}^{(t-1)}. \quad (6)$$

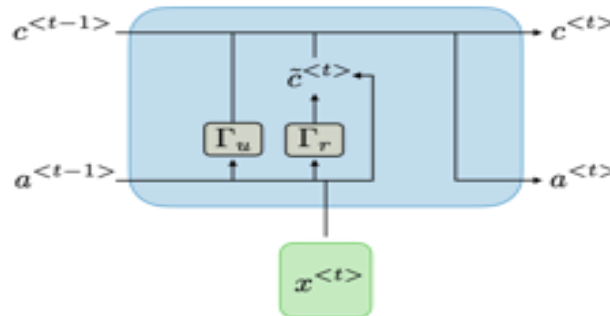
$a^{(t)}$  nin son değeri ise,

$$a^{(t)} = \Gamma_o * c^{(t)}. \quad (7)$$

olarak hesaplanır.

### 3.2. GRU (Gated recurrent unit)

Geçitlenmiş tekrarlayan birimler (GRU), LSTM'den türetilen ve Cho ve diğ. (2014) tarafından tanımlanan sinir ağındaki hücreler arasındaki bilgi akışını kontrol etmek için geçit mekanizmalarını kullanan bir tür RNN'dir [46]. GRU, güncelleme kapısı ve sıfırlama kapısı olmak üzere iki kapıdan oluşur, bu kapılar hangi bilgilerin kalması ve nelerin atılması gerektiğini filtrelemek için kullanılır. Geleneksel RNN'den farklı olarak GRU'lar, kaybolan ve patlayan gradyan problemlerini çözmektedir. LSTM'den farklı olarak GRU, bir geçidin olmaması nedeniyle LSTM'den daha az parametreye sahiptir. Diğer bir fark, GRU'ların LSTM'den hücre durumu eksikliğine sahip olmalarıdır, böylece GRU yalnızca hem uzun hem de kısa süreli belleği gizli durumda depolayabilmektedir.



Şekil 2. GRU mimarisi [45]  
(GRU architecture)

Özyinelemeli sinir ağları  $a$  katmanlarındaki aktivasyon fonksiyonları ve zamana bağlı işlemlerin yapılış şekline göre sınıflandırılabilir. Bu iç birimlerdeki bağlantı ve aktivasyon işlemleri modelin bellek özelliklerini doğrudan etkilemektedir [47]. Hatırlama ve unutma gibi işlemler bu birimlerde gerçekleştirilir [48]. Şekil 2'de bir GRU blok şeması gösterilmektedir.

$\hat{c}^{(t)}$  bellek için aday değeri sembolize eder. Aktivasyon fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant kullanılır.



Burada aday değeri şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{c}^{(t)} = \tanh(W_c[\Gamma_r * a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_c), \quad (8)$$

Güncelleme ve ilgi düzeyi kapısı değerleri için aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid kullanılır. Güncelleme ağ geçidi  $\Gamma_u$  ve ilgililik geçidi  $\Gamma_r$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Gamma_u = \sigma(W_u[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_u), \quad (9)$$

$$\Gamma_r = \sigma(W_r[a^{(t-1)}, x^{(t)}] + b_r). \quad (10)$$

$\Gamma_u$  kullanılarak yeni  $\hat{c}^{(t)}$  değeri şu şekilde elde edilebilir:

$$c^{(t)} = \Gamma_u * \hat{c}^{(t)} + (1 - \Gamma_u) * \hat{c}^{(t-1)}. \quad (11)$$

$a^{(t)}$  nin son değeri ise,

$$a^{(t)} = c^{(t)} \quad (12)$$

olarak hesaplanır.

### 3.3. GAN (Generative adversarial networks)

Üretici Çekişmeli Ağlar (Generative Adversarial Networks - GAN), görüntü, ses ve video gibi yüksek kaliteli sentetik veriler oluşturmak için popüler hale gelen bir derin öğrenme algoritmaları sınıfıdır. GAN modeli ilk olarak Goodfellow ve diğ. (2014) tarafından tanıtılmış ve bilgisayarlı görü, doğal dil işleme, görüntüden görüntüye çeviri ve tıbbi görüntüleme analizi dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır [49-51].

GAN modelinin arkasındaki temel fikir, gerçek verilerden ayırt edilemeyen sentetik veriler oluşturmak için bir model eğitmektir. Bunu yapmak için GAN'lar iki sinir ağı kullanır: bir üretici ve bir ayırıcı. Üretici, sentetik veri üretmek için eğitilirken, ayırıcı, belirli bir veri örneğinin gerçek mi yoksa sentetik mi olduğunu belirlemek için eğitilir. İki ağ, üretici ayırıcıyı kandırmaya çalışırken ve ayırıcı da sentetik verileri doğru bir şekilde tanımlamaya çalışırken, çekişmeli bir şekilde eğitilmektedir.

Bir GAN'daki üretici ve ayırıcı, üretilen ve gerçek veriler arasındaki farkı ölçen bir kayıp fonksiyonu kullanılarak eğitilir. Üretici bu kaybı en aza indirmek için eğitilirken, ayırıcı bunu en üst düzeye çıkarmak için eğitilir. Eğitim ilerledikçe, üretici gerçekçi veriler üretme yeteneğini geliştirirken, ayırıcı gerçek verileri sentetik verilerden ayırt etme yeteneğini geliştirir. Eğitim süreci, üretici gerçek verilerden ayırt edilemeyen veriler üretene kadar devam eder.

GAN'ların en güçlü yönlerinden biri, gerçek verilere benzer yüksek kaliteli sentetik veriler üretme yetenekleridir. Bu, onları tıbbi görüntüleme veya uydu görüntüleme gibi büyük miktarda etiketlenmiş verinin bulunmadığı uygulamalar için çok uygun hale getirir. Bu uygulamalarda, diğer makine öğrenimi modellerini eğitmek için kullanılacak sentetik veriler oluşturmak için GAN'lar kullanılabilir.

GAN'ların bir başka avantajı da çok yönlü olmalarıdır. Görüntüler, ses ve video dahil olmak üzere çeşitli veri türleri oluşturabilirler. Bu, gerçekçi yüzler oluşturmak, gerçekçi konuşmaları sentezlemek veya gerçekçi animasyonlar oluşturmak gibi belirli uygulamalar için birçok özel GAN'ın geliştirilmesine yol açmıştır.

GAN'da, kayıp fonksiyonu Jensen-Shannon (JS) Sapmasına dayanır; eğitim sürecinde GAN modeli, iki dağıtım arasındaki farkı en aza indirmek için çapraz entropi kaybını kullanmaktadır; böylece JS sapması en aza indirmeye çalışılır. Ayırıcı, gerçek veri örneklerini doğru sınıflandırmayı ve sahte veri örneklerini sahte olarak sınıflandırmayı amaçlar. Ayırıcı kayıp fonksiyonu şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\mathcal{L}_D = -\mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\log(D(x))] - \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [\log(1 - D(G(z)))], \quad (13)$$

Burada  $x \sim p_{data}(x)$ , gerçek veri dağılımından örneklenen gerçek veriyi,  $z \sim p_z(z)$ , gürültü dağılımından (genellikle normal veya uniform dağılım) örneklenen rastgele gürültü vektörünü ifade ederken  $G(z)$ , üreticinin gürültü vektöründen ürettiği veri örneğidir.

Üretici, ürettiği sahte verilerin ayrıştırıcı tarafından gerçek olarak tanınmasını amaçlar. Üretici kayıp fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$\mathcal{L}_G = -\mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [\log(1 - D(G(z)))], \quad (14)$$

GAN modelinin, yok olan gradyan, eğitim zorluğu ve zayıf çeşitlilik gibi birçok sorunu vardır [52]. Farklı optimizasyon yöntemleriyle daha iyi GAN'lar elde etmek için birçok çaba sarf edilmiştir. Bu nedenle, GAN ile ilgili üretilen sonuçların kararlılığını ve kalitesini iyileştirmek için birçok yeni GAN tabanlı model önerilmiştir [53].

#### 3.4. WGAN-GP (Wasserstein GAN with gradient penalty)

GAN'daki ayırıcı yeterince güçlü olmadığı ve eğitim sürecinin yavaş ve istikrarsız olduğu bilinmektedir. WGAN, GAN eğitimini stabilize etmeye ve geliştirmeye yardımcı olmak için önerilmiştir [23]. JS sapması, ayrık parçalara sahip dağılımlar arasındaki mesafeyi ölçmek için uygun değildir. Bu nedenle WGAN, Wasserstein mesafesi veya optimal iletim mesafesi olarak da bilinen, olasılık dağılımını  $q$ 'dan  $p$ 'ye dönüştüren minimum iletim kalitesine atıfta bulunan yeni bir mesafe ölçüm yöntemi olan Earth Moving Distance'ı önermiştir [54]. Wasserstein mesafesinin JS sapmasına göre üstünlüğü, iki dağılım örtüşmese bile Wasserstein mesafesinin mesafelerini yansıtabilmesidir.

Wasserstein mesafesi gerçek veri dağılımı  $P_r$ , oluşturulan veri dağılımı  $P_g$  olmak üzere matematiksel olarak en büyük alt sınır (infimum) olarak tanımlanır [4].

$$W(P_r, P_g) = \inf_{\gamma \in \Pi(P_r, P_g)} \mathbb{E}_{(x,y) \sim \gamma} [\|x - y\|] \quad (15)$$

$\Pi(P_r, P_g)$ ,  $P_r$  ve  $P_g$  arasındaki tüm ortak dağılımların kümesini ifade etmektedir. WGAN'da, bu mesafeyi hesaplamak için Kantorovich-Rubinstein dualitesini kullanarak şu şekilde bir kayıp fonksiyonu elde ederiz:

$$W(P_r, P_g) = \sup_{\|f\|_{L^1} \leq 1} \mathbb{E}_{x \sim P_r} [f(x)] - \mathbb{E}_{x \sim P_g} [f(x)] \quad (16)$$

burada sup en küçük üst sınırdır ve Burada  $f$ , 1-Lipschitz sürekli bir fonksiyondur. Bu nedenle, ayırıcı (WGAN terminolojisinde critic) fonksiyonu  $f$  olarak adlandırılır.

WGAN-GP, WGAN'ın bir varyasyonudur ve ağırlık kırpması (weight clipping) yerine gradient penalty (gradyan cezası) kullanarak daha stabil bir eğitim süreci sağlar. WGAN-GP, 1-Lipschitz sürekliliğini sağlamak için şu şekilde bir gradyan cezası terimi ekler:

$$\mathcal{L}_{GP} = \mathbb{E}_{\hat{x} \sim \mathbb{P}_{\hat{x}}} [(\|\nabla_{\hat{x}} f(\hat{x})\|_2 - 1)^2], \quad (17)$$

Burada  $\hat{x}$ , gerçek veri dağılımı  $x_r$  ve üretilmiş veri dağılımı  $x_g$  arasındaki doğrusal birleşimdir:

$$\hat{x} = x_r + (1-\epsilon)x_g, \quad 0 \leq \epsilon \leq 1, \quad (18)$$

ve  $\epsilon \sim U(0,1)$  bir uniform dağılımdan gelmektedir. Sonuç olarak, WGAN-GP'nin kayıp fonksiyonu şu şekilde yazılır:

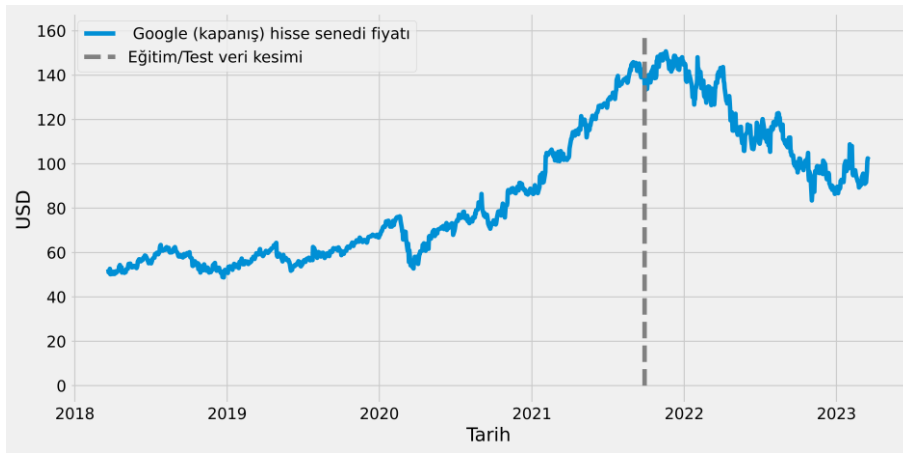
$$\mathcal{L} = \mathbb{E}_{\hat{x} \sim \mathbb{P}_{\hat{x}}} [f(\hat{x})] - \mathbb{E}_{x \sim P_r} [f(x)] + \lambda \mathcal{L}_{GP}. \quad (19)$$

Burada  $\lambda$  gradyan ceza terimidir. Özetle, GAN, WGAN ve WGAN-GP, gerçek veriye benzeyen veri

örnekleri üretmek için farklı teknikler kullanır ve GAN'ların eğitim stabilitesini artırır. GAN'lar Jensen-Shannon sapmasını kullanırken, WGAN'lar Wasserstein mesafesini ve WGAN-GP'ler ise Lipschitz sürekliliğini gradyan cezası ile sağlar.

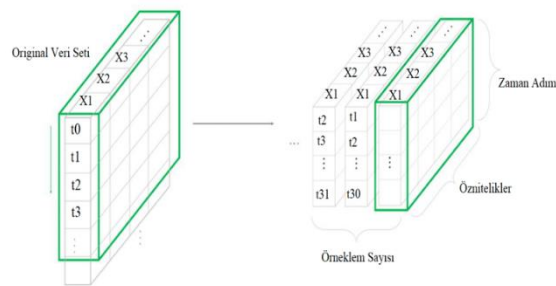
### 3.5. Veri (Data)

Hisse senedi fiyatı verileri ve hisse senedi endeksi verileri Yahoo Finance [55]'dan alınmıştır. Modeldeki hedef hisse senedi fiyatı Google hisse senedi kapanış fiyatıdır. İstatistiksel veriler hisse senedi kapanış fiyatı kullanılarak hesaplanmıştır. Veri setinde toplam 1258 gözlem bulunmaktadır. Şekil 3'te, Google (GOOG) hisse senedi kapanış fiyatının 22.03.2018 ile 21.03.2023 arasındaki seyri görülmektedir. Eğitim ve test verileri 7:3 oranında bölünmüştür. Grafikte gri kesikli çizgi ile gösterilen Eğitim/Test veri kesimine göre, 2010'dan 2019'a kadar olan günlük veriler eğitim, 2020'den 2024'e kadar olan veriler ise test verisi olarak kullanılacaktır.

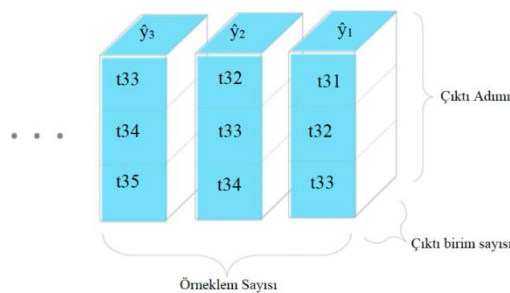


Şekil 3. Google hisse senedi kapanış fiyatları  
(Google stock closing prices)

Şekil 4'te görüldüğü gibi orijinal veri seti iki boyutludur ve zaman adımlarına göre 3 boyutlu olarak dönen pencere 1'e eşit olacak şekilde yeniden şekillendirilmiştir. Şekil 5, üreticiden elde edilen veri setinin çıktısını göstermektedir. Burada çıktı birimlerinin sayısı 1'e eşittir. Üç günlük hisse senedi fiyatını tahmin etmek için 30 günlük geçmiş fiyatı kullanılmıştır.



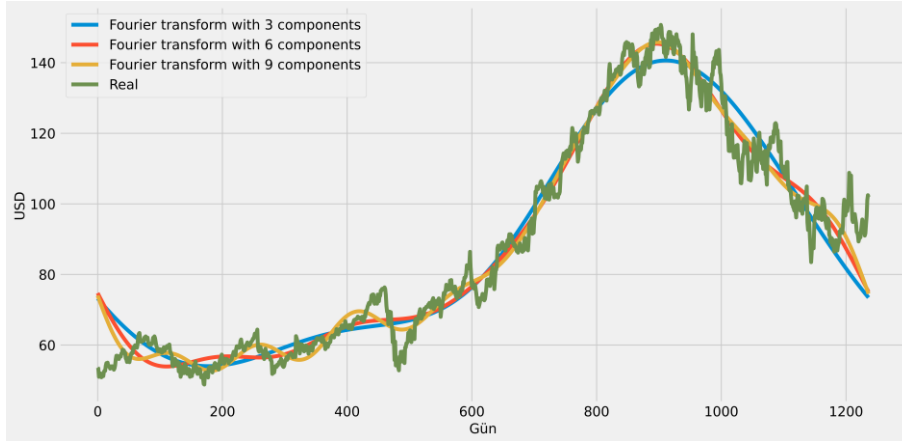
Şekil 4. Giriş verisi [23]  
(Input data)



Şekil 5. Çıktı verisi [23]  
(Output data)

Google hissesindeki uzun vadeli ve kısa vadeli trendleri çıkarmak için günlük kapanış fiyatıyla birlikte Fourier dönüşümleri oluşturulmuştur. Fourier dönüşümleri sinüs dalgası oluşturarak orijinal fonksiyona yaklaşır ve GRU ve LSTM ağının tahmin trendlerini daha doğru seçmesine yardımcı olmaktadır [56]. Fourier dönüşümü, bir zaman serisinin zaman alanındaki temsilini frekans alanına çevirmeye yarar. Başka bir deyişle, bir işaretin hangi frekans bileşenlerinden oluştuğunu bulmak için kullanılır. Eş. (20) ile zaman serisi verilerine hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak veri kümesine yeni özellikler eklenmektedir.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (20)$$



Şekil 6. Fourier dönüşümü  
(Fourier transform)

Hisse senedindeki küresel ve yerel eğilimleri çıkarmak ve aynı zamanda biraz gürültü çıkarmak için Fourier dönüşümler kullanılmıştır. Hisse senedi kapanış fiyatları, Fourier dönüşümü ile analiz edilerek, bu analizin sonuçlarını orijinal veri kümesine yeni özellikler olarak eklemeye yaramaktadır. Bu yeni özellikler, daha sonra derin öğrenme algoritmalarında kullanılmaktadır.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, Fourier dönüşümünden ne kadar çok bileşen kullanılırsa, yaklaşıklık fonksiyonu gerçek hisse senedi fiyatına o kadar yakın olmaktadır. Uzun ve kısa vadeli eğilimleri çıkarmak amacıyla Fourier dönüşümleri kullanılmıştır, bu nedenle 3, 6 ve 9 bileşenli dönüşümler kullanılmıştır. 3 bileşenli dönüşüm uzun vadeli trend olarak düşünülebilir.

Finansal piyasaları analiz ederken, birçok yatırımcı çeşitli teknik göstergelere başvurmaktadır. Bu çalışmada da yaygın olarak kullanılan bazı teknik göstergelerden 7 ve 21 günlük hareketli ortalama, üstel hareketli ortalama, momentum, Bollinger bantları ve Hareketli Ortalama Yakınsama İraksama (MACD) gibi göstergeler kullanılmıştır (Şekil 7). Bu göstergeler, yatırımcılara piyasa dinamiklerini daha iyi anlamada ve karar verme süreçlerinde önemli bilgiler sağlamaktadır.

7 ve 21 Günlük Hareketli Ortalama (Simple Moving Average - SMA), fiyat hareketlerini daha pürüzsüz hale getirerek trendleri daha kolay anlaşılır kılar. 7 ve 21 günlük hareketli ortalamalar sıklıkla kullanılır ve belirtilen süreler boyunca ortalama fiyatları gösterir. Örneğin, 7 günlük hareketli ortalama, son 7 günün kapanış fiyatlarının ortalamasını alır. Bu gösterge, kısa vadeli ve orta vadeli trendleri belirlemeye yardımcı olur. Üstel Hareketli Ortalama (Exponential Moving Average - EMA), SMA'ya benzer şekilde, fiyat hareketlerini pürüzsüzleştirir. Ancak, EMA daha yakın zamandaki fiyat hareketlerine daha fazla ağırlık verir. Bu, EMA'nın SMA'dan daha hızlı tepki vermesini sağlar ve böylece trend değişikliklerini daha çabuk yakalar.



Şekil 7. Teknik analiz  
(Technical analysis)

Momentum, bir finansal enstrümanın fiyat değişiminin hızını veya gücünü ölçer. Momentum, belirli bir zaman dilimi boyunca fiyat değişimlerinin ortalamasını hesaplayarak elde edilir. Yükselen momentum, artan fiyat hareketleri ve potansiyel yükseliş trendleri için güçlü bir göstergeden, düşen momentum düşüş eğilimlerine işaret edebilir. Bollinger Bantları, bir finansal enstrümanın oynaklığını ve potansiyel aşırı alım veya aşırı satım durumlarını ölçmek için kullanılır. Bollinger Bantları, hareketli bir ortalamanın üzerine ve altına yerleştirilen iki standart sapma bandıyla oluşur. Fiyatlar üst banda yaklaştığında aşırı alım, alt banda yaklaştığında ise aşırı satım olarak kabul edilir. Hareketli Ortalama Yakınsama İraksama (Moving Average Convergence Divergence, MACD), iki hareketli ortalama (genellikle 12 ve 26 günlük) arasındaki farkı ölçer ve bunu bir sinyal çizgisi (genellikle 9 günlük EMA) ile karşılaştırır. MACD çizgisi sinyal çizgisinin üzerine çıktığında, bu alım sinyali olarak yorumlanırken, sinyal çizgisinin altına düştüğünde satış sinyali olarak değerlendirilir. Bu göstergeler, yatırımcıların piyasa eğilimlerini ve potansiyel alım-satım fırsatlarını değerlendirmelerine yardımcı olur. Teknik göstergeler, genellikle yatırımcılar tarafından birbirleriyle birleştirilerek veya temel analizle birlikte kullanılarak daha güçlü ve güvenilir alım-satım sinyalleri üretir. Önemli olan, yatırımcıların bu göstergeleri ve stratejileri kendi risk ve ödül tercihlerine uygun bir şekilde uyarlamalarıdır. Tablo 1'de analizde kullanılan öznitelikler ve açıklamaları görülmektedir.

Tablo 1. Öznitelikler (Features)

Öznitelik adı	Öznitelik açıklaması
Open	İşlem günündeki açılış fiyatı
High	İşlem günündeki en yüksek fiyat
Low	İşlem günündeki en düşük fiyat
Close	İşlem günündeki kapanış fiyatı
Volume	Bir önceki işlem günündeki hacim
MA7	7 günlük basit hareketli ortalama
MA21	21 günlük basit hareketli ortalama
MACD	Hareketli ortalama yakınsama/ıraksama
20SD	Bollinger bantları orta eğri
Upper	Bollinger bandı üst eğri
Lower	Bollinger Bandı alt eğri
EMA	Üstel hareketli ortalama
logmomentum	Logaritmik momentum göstergesi
absolute of 3 comp	3. dereceden yeniden yapılandırma (mutlak)
angle of 3 comp	3. dereceden yeniden yapılandırma (açı)
absolute of 6 comp	6. dereceden yeniden yapılandırma (mutlak)
angle of 6 comp	6. dereceden yeniden yapılandırma (açı)
absolute of 9 comp	9. dereceden yeniden yapılandırma (mutlak)
angle of 9 comp	9. dereceden yeniden yapılandırma (açı)

### 3.5. Deneysel tasarım (Experimental design)

Bu çalışma, son 30 günün verileriyle önümüzdeki üç gündeki hisse senedi kapanış fiyatını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Veri seti %70 ve %30 olmak üzere eğitim seti ve test seti olarak bölünmüştür. Bu çalışmanın çerçevesi, TensorFlow [38] arka ucuna sahip Keras [39] ile oluşturulmuştur. Aktivasyon

fonksiyonları için üretici ağ lineer (aktivasyonsuz) kullanılırken, çekişmeli ağ 0,01 gibi düşük bir eşik değerine sahip Leaky ReLU deneysel olarak iyi bir performansla sonuçlanmıştır.

Tahmin modellerinin doğruluğunu belirlemek için değerlendirme gereklidir. Modelin tahmin performansını görselleştirmek amacıyla, gerçek fiyatlar ile tahmin edilen fiyatları karşılaştıran bir saçılım grafiği kullanılmıştır. Ayrıca, modelin performansını değerlendirmek için hata metrikleri olarak hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve  $R^2$  skorları hesaplanmıştır. RMSE, MAE ve  $R^2$ , literatürde en sık kullanılan performans değerlendirme ölçütlerinden bazılarıdır [57].

Bu çalışmada, her modelin performansı Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE),

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2}, \quad (21)$$

Ortalama Mutlak hata (MAE),

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y_i^*|, \quad (22)$$

ve  $R^2$ ,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (23)$$

ile değerlendirilmiştir. Burada N veri sayısı,  $y_i$  gerçek hisse senedi fiyatı,  $y_i^*$  tahmin edilen hisse senedi fiyatı ve  $\bar{y}$  ortalama fiyatı belirtmektedir.

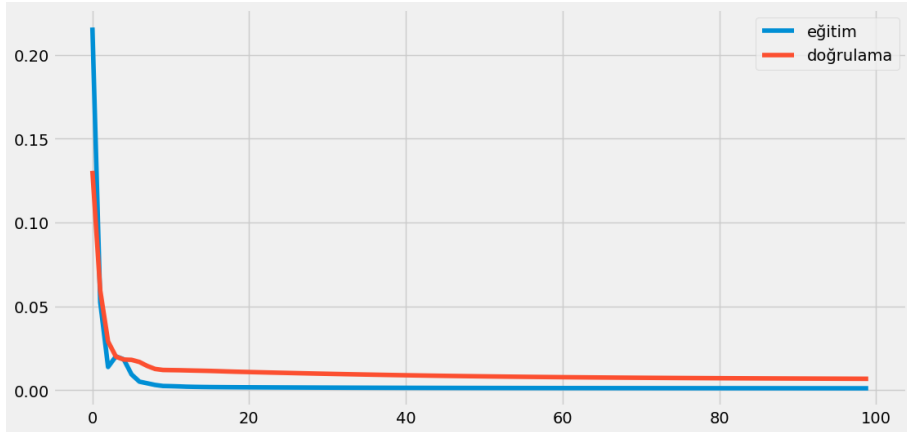
## 4. Bulgular (Results)

Bu bölümde, hisse senedi fiyat tahmini için kullanılan LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP modellerinin detayları ve performanslarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Her modelin performansı, eğitim ve test veri kümeleri için Hata Kareler Ortalamasının Karekökü (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve  $R^2$  değerleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, modellerin öğrenme süreci ve tahmin performansı üzerindeki etkilerini gözlemlenmek amacıyla çeşitli hiper parametreler ve optimize ediciler kullanılmıştır. Bu bölümde, her modelin uygulanması ve sonuçlarının analizi ayrı ayrı ele alınarak, en iyi performans gösteren modelin belirlenmesine yönelik bir değerlendirme yapılmaktadır.

### 4.1. LSTM tahmin sonucu (LSTM prediction results)

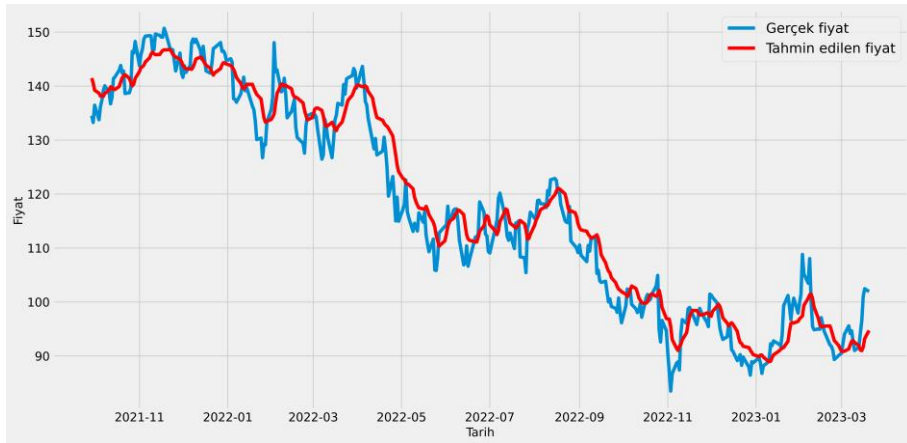
LSTM modelinde ilk katmanda çift yönlü LSTM kullanılmıştır. Çift yönlü LSTM katmanı, zaman serisi verilerinde gelecekteki ve geçmişteki bilgilerin daha etkili bir şekilde öğrenilmesini sağlar. Dense katmanları ise modelin daha derin ilişkileri öğrenmesine olanak tanır. Çalışmamızda, modellerimizi eğitmek için temel olarak öğrenme oranı 0.0001 olan Adam (Adaptive Moment Estimation) optimize edicisi kullanılmıştır. Adam, adaptif öğrenme oranı ve momentum içeren bir optimizasyon algoritmasıdır ve genellikle hızlı ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu oran, LSTM modelinin hızlı ve etkili bir şekilde öğrenmesini sağlamaktadır. Yığın boyutu 128'dir ve model, veri kümesinde 100 dönem eğitilmiştir. Bu boyut, modelin her iterasyonda yeterli veri görmesini ve daha sık güncellenmesini sağlar. Modelin öğrenme oranı, yığın boyutu ve dönem sayısı, farklı kombinasyonlar deneyerek en iyi sonuçlar veren ayarlar olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin belirlenmesi sırasında modelin eğitim ve doğrulama performansları dikkate alınmıştır. Öğrenme sürecinde kayıp değerlerinin takibi yapılmış ve modelin doğrulama performansı izlenmiştir.



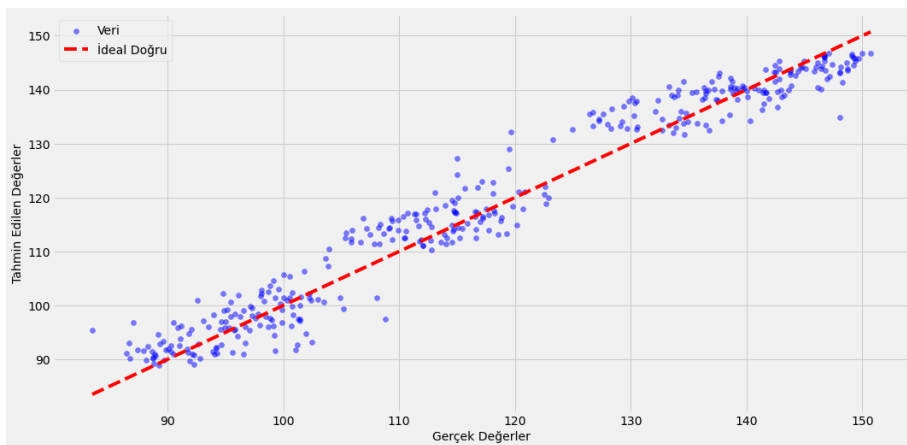


Şekil 8. LSTM modeli için eğitim ve doğrulama kümelerinin kayıp fonksiyonlarının iterasyona göre değişimi (LSTM model loss for training and test set)

Şekil 8'de LSTM modeli için eğitim ve doğrulama başarımı gösterilmiştir. RMSE, eğitim verisi için 1,74 iken test verisi için 4,21'dir. MAE ise eğitim verisi için 1.29 iken test verisi için 3.39'dur. R2 değeri ise eğitim verisi için %99.53 iken test verisi için %95,09'dur. Şekil 9'da mavi çizgi hisse senedi fiyatını ve kırmızı çizgi tahmin edilen hisse senedi fiyatını göstermektedir. Şekil 10, LSTM modelinin gerçek ve tahmini fiyatların saçılım grafiğini göstermektedir. Buna göre LSTM modeli en iyi performansı göstermektedir.



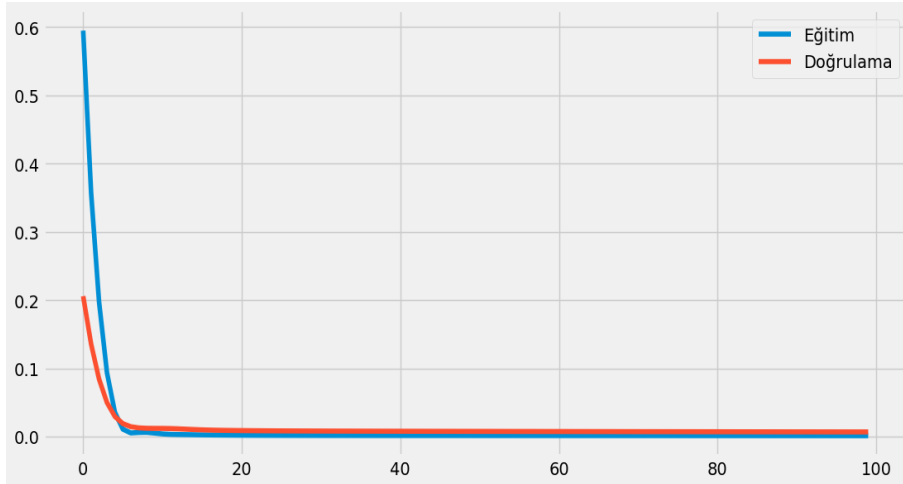
Şekil 9. LSTM tahmin sonucu (LSTM prediction result)



Şekil 10. LSTM modelinin gerçek ve tahmini fiyatlarının dağılımı (Scatter of actual and forecast prices of the LSTM model)

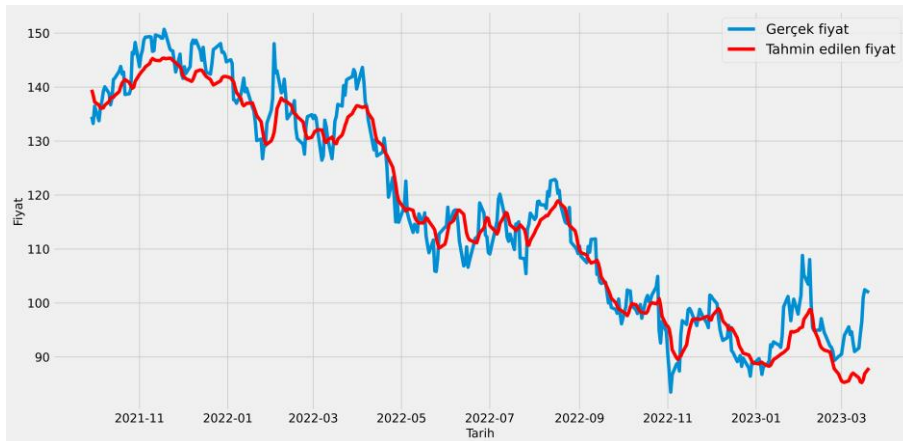
#### 4.2. GRU tahmin sonucu (GRU prediction results)

GRU modelini oluşturmak için 2 GRU katmanı kullanılmıştır ve optimizasyon için öğrenme oranı 0.0001 olan Adam algoritması kullanılmıştır. Yığın boyutu 128'dir ve model 100 dönem eğitilmiştir.

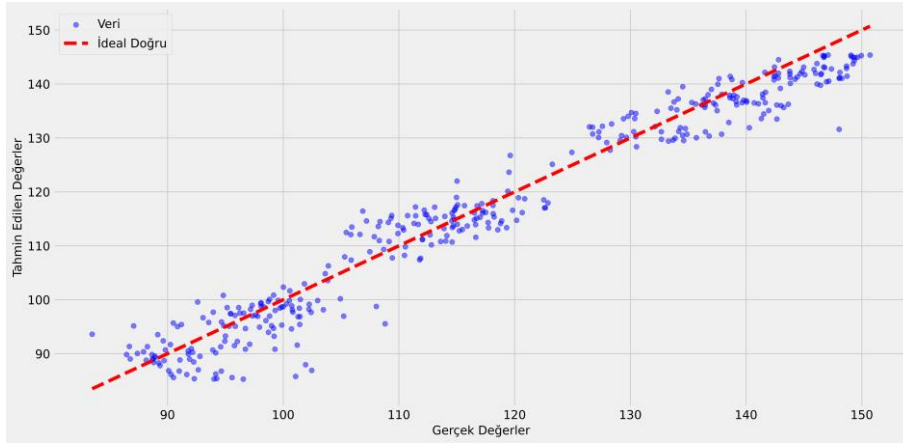


Şekil 11. GRU modeli için eğitim ve doğrulama kümelerinin kayıp fonksiyonlarının iterasyona göre değişimi (GRU model loss for training and test set)

Şekil 11, GRU için eğitim ve doğrulama başarımını, Şekil 12, GRU modelinin tahmin sonucunu, Şekil 13 ise GRU modelinin gerçek ve tahmini fiyatların saçılım grafiğini göstermektedir. RMSE eğitim verisi için 2.02 iken test verisi için 4.30'dur. MAE ise eğitim verisi için 1.51 iken test verisi için 3.42'dir. R2 değeri ise eğitim verisi için %99.36 iken test verisi için %94.40'tır. Performans olarak GAN modelinden sonra gelmektedir. Bu sonuç, tahminin 2020'de gerçek fiyat ile tahmin edilen fiyat arasında büyük bir boşluk oluşmaya başladığını ve gerçek fiyatta beklenmedik bir olay olan COVID-19'dan kaynaklanabilecek ani bir artış olduğunu gösteriyor. Tahmin için GRU'nun beklenmedik olaylar meydana geldiğinde her iki temel modelden daha kötü performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 12. GRU tahmin sonucu (GRU prediction result)

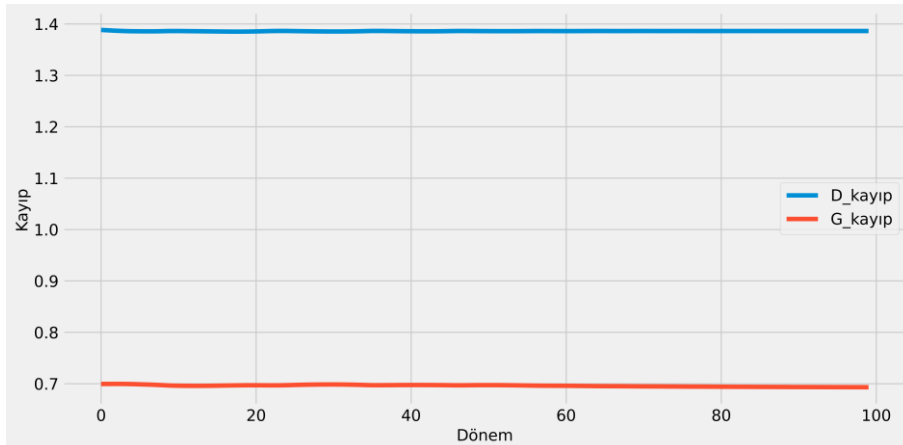


Şekil 13. GRU modelinin gerçek ve tahmini fiyatlarının dağılımı  
(Scatter of actual and forecast prices of the GRU model)

#### 4.3. GAN tahmin sonucu (GAN prediction results)

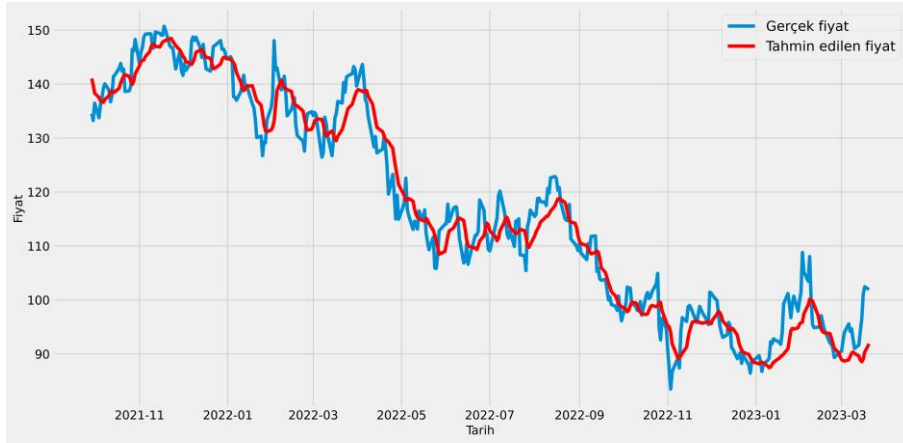
Bu çalışmada kullanılan GAN modeli, üretici ve ayırıcı olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Üretici modeli, üç katmanlı GRU ve Dense katmanları kullanarak sahte veri üretir. Ayırıcı model ise, üç katmanlı Conv1D ve Dense katmanlarıyla girdi verisinin gerçek mi sahte mi olduğunu belirler. GAN eğitimi sırasında, üretici daha gerçekçi veriler üretmeye çalışırken, ayırıcı bu verileri ayırt etmeye çalışır, böylece her iki model de performansını artırır.

Bu modelde, optimize edici, öğrenme oranı 0.0001 olan Adam algoritmasıdır. Yığın boyutu 128'dir ve bu veri kümesindeki model 100 dönem için eğitilmiştir. Farklı öğrenme oranları ve yığın boyutları, çeşitli denemeler sonucunda belirlenmiştir. Modelin performansını optimize etmek için çeşitli kombinasyonlar denenmiş ve en iyi performansı veren parametreler seçilmiştir. Şekil 14, mavi çizgi ayırıcının kayıp çizgisi ve kırmızı üreticinin kayıp çizgisi olmak üzere temel GAN modelinin kayıp grafiğidir. Başından itibaren, ayırıcının kaybı üreticinin kaybindan daha fazladır ve eğitim süreci boyunca her iki kayıp çizgisi de düz hale gelmiştir.

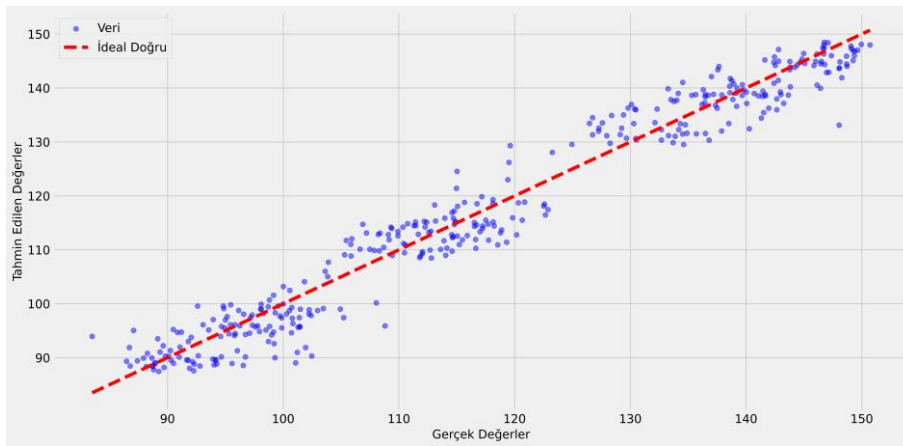


Şekil 14. GAN modeli için eğitim ve doğrulama kümelerinin kayıp fonksiyonlarının iterasyona göre değişimi  
(GAN model loss for training and test set)

Şekil 15, GAN modelinin tahmin sonucunu ve Şekil 16 ise GAN modelinin gerçek ve tahmini fiyatların saçılım grafiğini göstermektedir. GAN modelinin RMSE değeri eğitim verisi için 2,30, test verisi için 4,05 iken MAE eğitim verisi için 1,69, test verisi için 3,29'dur.  $R^2$  değeri ise eğitim verisi için %99,09 olurken test verisi için %95,78'dir. Buna göre GAN modeli LSTM modelinden sonra en iyi performansı göstermektedir.



Şekil 15. GAN tahmin sonucu  
(GAN prediction result)

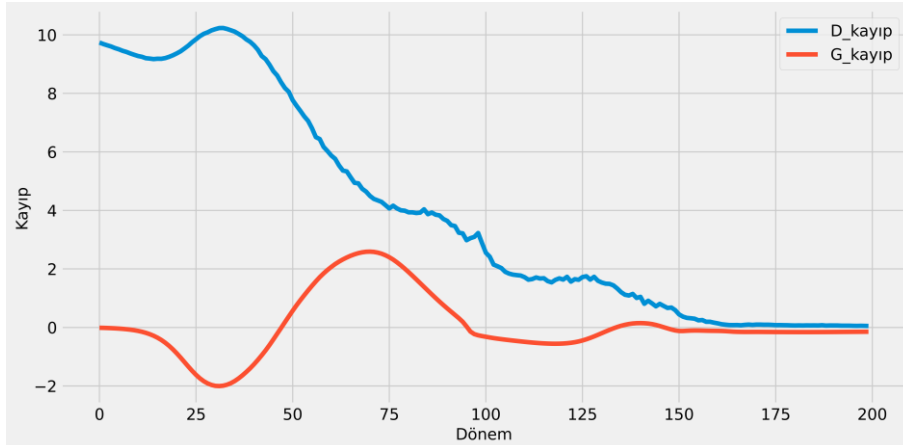


Şekil 16. GAN modelinin gerçek ve tahmini fiyatlarının dağılımı  
(Scatter of actual and forecast prices of the GAN model)

#### 4.4. WGAN-GP tahmin sonucu (WGAN-GP prediction results)

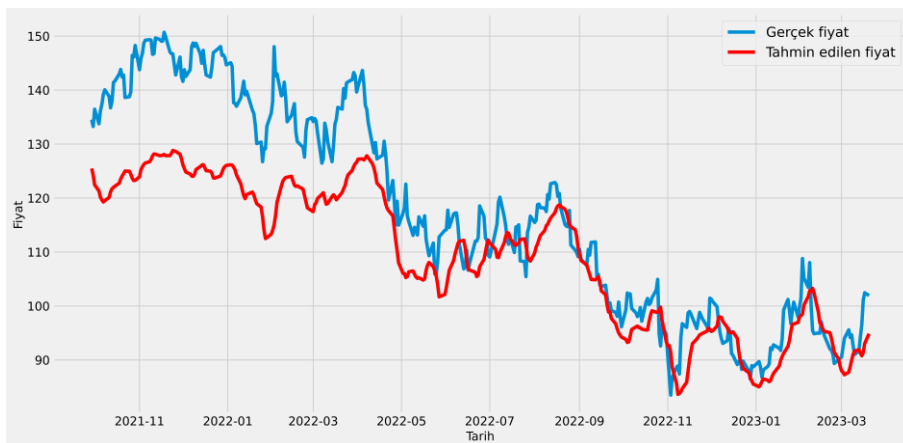
WGAN-GP modeli, üretici ve ayırıcı olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Üretici modeli, GRU ve Dense katmanları kullanarak sahte veri üretirken, ayırıcı model Conv1D ve Dense katmanlarıyla verinin gerçek mi yoksa sahte mi olduğunu belirler. Modelin eğitim sürecinde, gradyan ceza uygulanarak ayırıcının öğrenme süreci dengelenir. Üretici ve ayırıcı modeller, sahte veriler üretip bunları ayırt etmeye çalışarak birbirlerine karşı öğrenir ve böylece her iki modelin de performansı artırılır.

WGAN-GP modelinde optimize edici, öğrenme oranı 0.0001 olan bir Adam algoritmasıdır. Bu, modelin daha yavaş ama daha stabil bir şekilde öğrenmesini sağlamaktadır. WGAN-GP, GAN'den farklı olarak, modelin stabilitesine ve GAN modelinin eğitiminde görülen yaygın problemleri azaltmaya odaklanır. Yığın boyutu 128'dir ve model bu veri seti üzerinde 200 dönem için eğitilmiştir. Bu çalışmada ayırıcıyı bir kez, üretici üç kez eğitilmiştir. WGAN-GP modelinin optimizasyon süreci, GAN'den farklı olarak gradyan cezası kullanılmaktadır. Bu, ayırıcının daha iyi bir şekilde eğitilmesini sağlar ve GAN eğitiminde sıkça karşılaşılan sorunları azaltır. Farklı parametre kombinasyonları denenerek, modelin en iyi performansı göstermesi sağlanmıştır. Şekil 17, WGAN-GP modelinin kayıp grafiğidir, mavi çizgi ayırıcının kayıp yoludur ve turuncu çizgi, üreticinin kayıp yoludur. Ayırıcı kaybı 0'a doğru azalmaktadır. GAN ile karşılaştırıldığında, WGAN-GP'deki ayırıcı daha iyi öğrenmektedir.

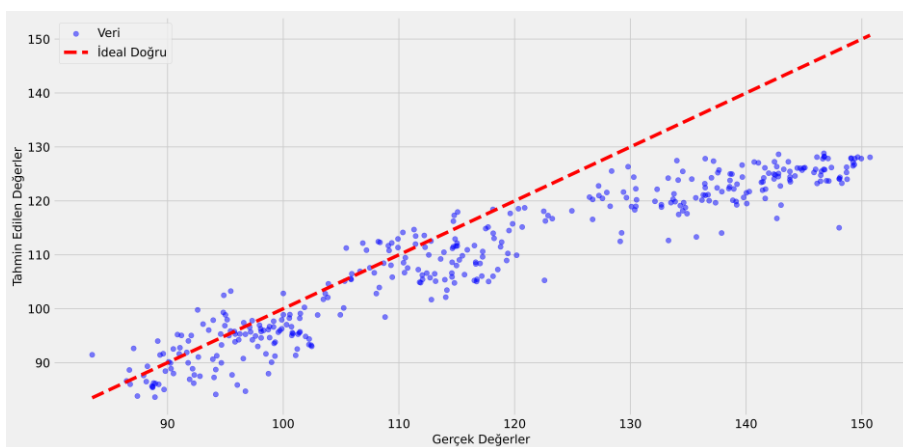


Şekil 17. WGAN-GP modeli için eğitim ve doğrulama kümelerinin kayıp fonksiyonlarının iterasyona göre değişimi (WGAN-GP model loss for training and test set)

Şekil 18, WGAN-GP modelinin tahmin sonucunu, Şekil 19,  $R^2$  grafiğini göstermektedir. RMSE eğitim veri seti için 4,20, test veri seti için 11,52 iken MAE eğitim veri seti için 2,85, test veri seti için 9,02'dir.  $R^2$  değeri ise eğitim verisi için %96,81 olurken test verisi için %24,52'tür. Bu sonuç modellerde en yüksek hata oranıdır. GRU modelinde olduğu gibi, tahminde beklenmedik COVID-19 nedeniyle gerçek fiyat ile tahmin edilen fiyat arasında büyük bir boşluk oluşmaya başlamaktadır.



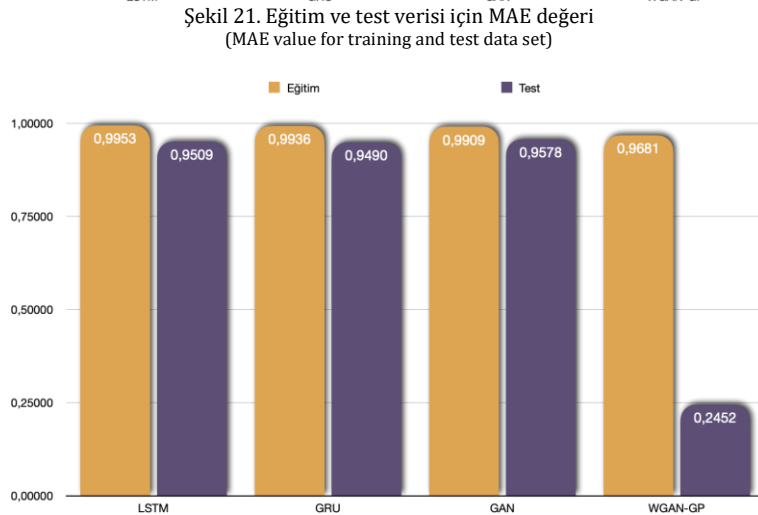
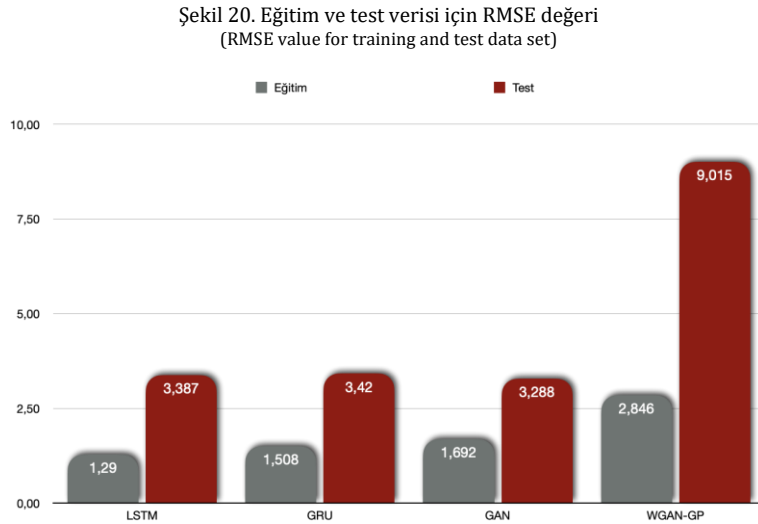
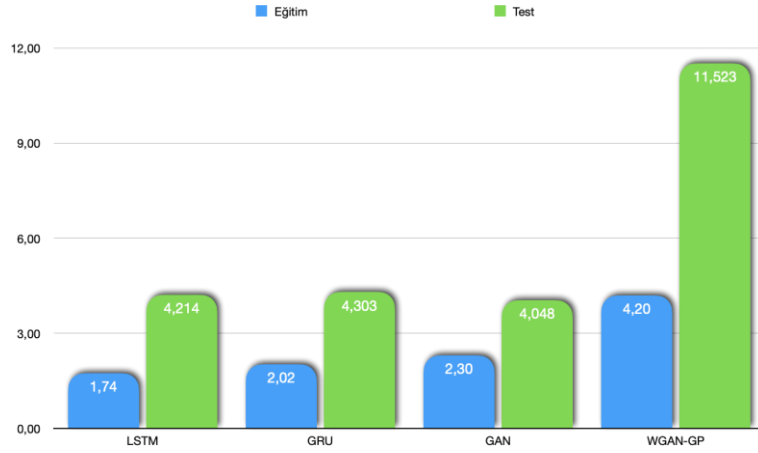
Şekil 18. WGAN-GP tahmin sonucu (WGAN-GP prediction result)



Şekil 19. WGAN-GP modelinin gerçek ve tahmini fiyatlarının dağılımı (Scatter of actual and forecast prices of the WGAN-GP model)

Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22, deneysel çalışmada kullanılan dört model için sırasıyla RSME, MAE ve  $R^2$  değerlerini karşılaştırmaktadır. Buna göre eğitim ve test veri kümesi için LSTM modeli en iyi performansı sergilerken, GAN modeli ikinci en iyi performansı göstermiştir. GRU modeli ise, LSTM ve GAN'dan daha düşük performans gösterirken, WGAN modeli en düşük performansa sahiptir. Bu

modellerde, gerçek fiyatlar ve tahminler arasında 2020'de COVID-19 nedeniyle beklenmedik bir olay gerçekleştiğinde büyük boşluklar oluşturmaya başlamıştır. Bu da bu tür modellerin beklenmedik olaylarla başa çıkmakta zorlanabileceğini göstermektedir.



Şekil 22. Eğitim ve test verisi için R² değeri (R² value for training and test data set)

#### 4. Tartışma (Discussion)

Bu çalışma kapsamında, hisse senedi fiyatlarının tahmin edilmesi için LSTM, GRU, GAN ve WGAN-GP derin öğrenme yöntemleri kullanılarak ampirik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, incelenen modellerin hisse senedi fiyat tahminindeki performanslarını ve zorluklarını ortaya



koymaktadır.

Araştırmamızda kullanılan LSTM ve GAN modelleri, hem eğitim hem de test verisi üzerinde düşük hata ve yüksek doğruluk değerleri ile en iyi performansı göstermiştir. LSTM modelinin eğitim verisindeki RMSE değeri 1.74 ve doğruluk değeri 0.9953, test verisindeki RMSE değeri 4.214 ve doğruluk değeri 0.9509 olup, modelin yüksek doğruluk ve düşük hata ile çalıştığını göstermektedir. Bu sonuç, mevcut literatürde LSTM'nin finansal zaman serilerinin tahmininde etkili bir yöntem olduğunu doğrular niteliktedir [58-60]. Özellikle, Gers ve diğ. (2002), Lu ve diğ. (2020), Lv ve diğ. (2021) gibi çalışmalar, LSTM'nin finansal tahminlerde güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen RMSE ve MAE değerleri, LSTM modelinin hisse senedi fiyatlarını başarılı bir şekilde tahmin etme yeteneğini göstermektedir [17,61,62].

Benzer şekilde, GAN modelinin eğitim verisindeki RMSE değeri 2.30 ve doğruluk değeri 0.9909, test verisindeki RMSE değeri 4.048 ve doğruluk değeri 0.9578 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, GAN modelinin de yüksek doğruluk ve düşük hata oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. [64]. GRU modelinin eğitim verisindeki RMSE değeri 2.02 ve doğruluk değeri 0.9936, test verisindeki RMSE değeri 4.303 ve doğruluk değeri 0.9490 olup, GAN modeline göre biraz daha düşük performans sergilemektedir [44]. GRU'nun beklenmedik olaylar (COVID-19 pandemisi) meydana geldiğinde performansının düştüğü gözlemlenmiştir [63]. Bu durum, GRU modelinin daha dayanıklı hale getirilmesi gerektiğini göstermektedir.

WGAN-GP modelinin eğitim verisindeki RMSE değeri 4.20 ve doğruluk değeri 0.9681, test verisindeki RMSE değeri 11.523 ve doğruluk değeri 0.2452 olup, diğer modellere kıyasla daha yüksek hata oranına ve düşük doğruluğa sahiptir. [65]. Sonuç olarak, LSTM ve GAN modelleri en iyi performansı sergileyen modeller olarak öne çıkmaktadır. GRU modeli de kabul edilebilir performans göstermekte olup, GAN ve LSTM modellerinin ardından gelmektedir. WGAN-GP modeli ise eğitim verisinde makul bir performans gösterse de test verisinde düşük performans sergilemektedir. WGAN-GP'nin başarılı olduğu görüntü sentezi ve diğer alanlardaki performansını finansal tahminlere aktarmak için yapılandırma ve eğitim süreçlerinde önemli iyileştirmeler yapılması gerekmektedir [54,66]. Ayrıca, WGAN-GP gibi modellerin beklenmedik olaylara karşı daha dayanıklı olabilmesi için tahmin süreçlerinin adaptasyon mekanizmalarının geliştirilmesi önemlidir.

Tablo 2. Geçmiş çalışmalar (Past studies)

Çalışma	Yöntem	RMSE
[21]	LSTM	5.41
	GAN	4.10
[23]	CNN	42.97
	RNN	42.96
	LSTM	41.00
	CNN-RNN	40.54
[32]	CNN-LSTM	39.69
	LSTM	6.60
	GRU	-5.33
	GAN	5.36
[67]	WGAN-GP	4.77
	LSTM	1.05
	GRU	0.95
Bu çalışma	WGAN-GP	0.49
	LSTM	4.21
	GRU	4.30
	GAN	4.05
	WGAN-GP	11.52

Tablo 2'de, literatürde yapılmış olan bazı çalışmalara ait sonuçlar özetlenmiştir. Zang ve diğ. (2019), GAN tabanlı yöntemin hisse senedi piyasası tahminlerinde başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu yöntem, diğer geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde etmekte ve özellikle kısa vadeli tahminlerde etkilidir [14]. Lu ve diğ. (2020), yöntemler arasında CNN-LSTM'nin performansının en iyi olduğunu göstermektedir [17]. Tahmin doğruluğu açısından RMSE 39.69'dur, bu değerler tahmin modelleri arasında en düşük olanıdır ve yüksek tahmin doğruluğuna sahiptir. Lin ve diğ. (2021), GAN tabanlı modelin hisse senedi fiyat tahminlerinde etkili olduğunu göstermektedir [23]. GAN modeli diğer geleneksel ve makine öğrenimi yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Xu ve diğ. (2022), WGAN-GP modelinin RMSE değerinin en düşük olduğunu göstermiş ve sırasıyla LSTM ve GRU modellerinden %61.94 ve %47.42 daha düşüktür. WGAN-GP

modeli, klasik zaman serisi tahmin modellerinden daha yüksek tahmin doğruluğu elde etmiştir [67].

#### 4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma, incelenen derin öğrenme yöntemlerinin hisse senedi fiyat tahminindeki performanslarını ve zorluklarını gözler önüne sermektedir. Sonuçlar, literatürdeki bulgularla uyumlu olup, LSTM ve GAN modellerinin bu alanda kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, GRU ve WGAN-GP modellerinin finansal tahminlerde daha güçlü bir performans sergilemesi için yapılandırma, eğitim ve özellikle beklenmedik olaylara adaptasyon süreçlerinde önemli iyileştirmeler yapılması gerekmektedir.

İleride yapılacak çalışmalar, derin öğrenme modellerinin daha geniş finansal veri kümesi üzerinde test edilmesi, farklı parametre ve yapılandırmaların deneyimlerinin incelenmesi ve bu modellerin çeşitli hisse senedi piyasalarında uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi üzerine odaklanabilir. Ayrıca, modellerin duyarlılık analizi ve hiper parametre optimizasyonu için daha kapsamlı denemeler de gelecekteki çalışmalarda değerli bilgiler sunabilir.

Ek olarak, daha karmaşık ve gerçek dünya finansal piyasalarına özgü faktörlerin modellere dahil edilmesi, tahmin performansını daha da artırabilir. Örneğin, temel ve teknik analiz verilerinin yanı sıra makroekonomik faktörlerin ve piyasa duyarlılık analizlerinin modelin tahmin yeteneğini nasıl etkilediğini araştırmak ilgi çekici olacaktır. Ayrıca, modellerin portföy yönetimi ve risk yönetimi stratejilerine nasıl entegre edilebileceği de değerlendirilmelidir.

Bu çalışmanın bir başka önemli boyutu, transfer öğrenme ve multitask öğrenme gibi daha gelişmiş öğrenme tekniklerinin finansal tahmin modellerine uygulanmasının araştırılmasıdır. Transfer öğrenme, bir modelin önceden öğrendiği bilgileri farklı ancak ilişkili bir görevde kullanmasını sağlayan bir makine öğrenmesi tekniğidir. Finansal tahmin modellerinde transfer öğrenme, farklı hisse senetleri, piyasa segmentleri veya ekonomik göstergeler arasındaki benzerliklerden faydalanarak tahmin performansını iyileştirebilir. Multitask öğrenme ise aynı anda birden fazla görevi öğrenen ve bu görevler arasında bilgi paylaşımını optimize eden bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Finansal tahmin modellerinde multitask öğrenme, farklı finansal göstergeleri veya hisse senetlerini aynı anda tahmin ederek model performansını artırabilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, derin öğrenme yöntemlerinin hisse senedi fiyat tahminindeki uygulanabilirliği ve sınırlılıkları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, LSTM ve GAN modellerinin finansal tahminlerde etkili olduğunu ve mevcut literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir. GRU ve WGAN-GP modelleri, beklenmedik olaylar ve finansal piyasalardaki belirsizlikler nedeniyle daha düşük performans sergilemektedir. Bu modellerin hisse senedi fiyat tahminindeki başarısını artırmak için daha fazla araştırma ve geliştirme yapılması gerekmektedir.

İleride yapılacak çalışmalar, farklı hisse senedi piyasaları ve finansal veriler üzerinde modellerin performansını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilir. Ayrıca, daha gelişmiş öğrenme tekniklerinin ve veri entegrasyon stratejilerinin modellerin tahmin performansına nasıl katkıda bulunduğu üzerine odaklanabilir. Bu çerçevede, gelecekteki araştırmalar, hisse senedi fiyat tahminindeki derin öğrenme yöntemlerinin potansiyelini daha da geliştirmek için önemli katkılar sağlayacaktır.

#### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### Kaynaklar (References)

- [1] P. J. Brockwell, R. A. Davis, *Time Series: Theory and Methods*, Springer Science & Business Media, New York, USA, 2013.
- [2] J. D. Hamilton, *Time Series Analysis*, Vol. 2, Princeton University Press, Princeton, USA, 1994.
- [3] R. H. Shumway, D. S. Stoffer, *Time Series Analysis and Its Applications*, Springer, New York, USA, 2011.
- [4] X. Zhou, Z. Pan, G. Hu, S. Tang, and C. Zhao, "Stock Market Prediction on High-Frequency Data Using Generative Adversarial Nets," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, pp. 1–11, 2018. doi:10.1155/2018/4907423

- [5] Y. Kara, M. A. Boyacioglu, and Ö. K. Baykan, "Predicting direction of stock price index movement using artificial neural networks and support vector machines: The sample of the Istanbul Stock Exchange," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 5311-5319, May 2011. doi:10.1016/j.eswa.2010.10.027
- [6] K. Karagül, "İstanbul Menkul Kıymetler Borsası'nda İşlem Gören Firmaların Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Sınıflandırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 5, ss. 174-178, 2014. doi:10.5505/pajes.2014.63835
- [7] R. S. Latha, G. R. Sreekanth, R. C. Suganthe, M. Geetha, R. E. Selvaraj, S. Balaji, K. R. Harini, and P. P. Ponnusamy, "Stock Movement Prediction using KNN Machine Learning Algorithm," in *Proceedings of the 2022 Int. Conf. on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, Mar. 15-17, 2022, Online [Online]. Available: IEEE Xplore. [Accessed: Mar. 9, 2023]. doi:10.1109/iccci54379.2022.9740781
- [8] G. Kemalbay and B. N. Alkış, "Borsa endeks hareket yönünün çoklu lojistik regresyon ve k-en yakın komşu algoritması ile tahmini," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 27, no. 4, pp. 556-569, 2021.
- [9] S. Madge and S. Bhatt, "Predicting Stock Price Direction using Support Vector Machines," *Independent Work Report*, vol. 45, 2015.
- [10] K. Khare, O. Darekar, P. Gupta, and V. Z. Attar, "Short term stock price prediction using deep learning," in *Proceedings of the 2nd IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, May 19-20, 2017, Bangalore, India [Online]. Available: IEEE Xplore. [Accessed: Mar. 9, 2023].
- [11] S. Selvin, R. Vinayakumar, E. A. Gopalakrishnan, V. K. Menon, and K. P. Soman, "Stock price prediction using LSTM, RNN and CNN-sliding window model," in *Proceedings of the Int. Conf. on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Sept. 13-16, 2017, Udipi, India [Online]. Available: IEEE Xplore. [Accessed: Mar. 9, 2023].
- [12] L. Ji, Y. Zou, K. He, and B. Zhu, "Carbon futures price forecasting based with ARIMA-CNN-LSTM model," *Procedia Computer Science*, vol. 162, pp. 33-38, 2019.
- [13] R. Alberto and C. Romero, "Generative Adversarial Network for Stock Market price Prediction," Unpublished report, Stanford University, San Francisco, USA, 2019.
- [14] K. Zhang, G. Zhong, J. Dong, S. Wang, and Y. Wang, "Stock Market Prediction Based on Generative Adversarial Network," *Procedia Computer Science*, vol. 147, pp. 400-406, 2019.
- [15] H. Raşo and M. Demirci, "Predicting the Turkish Stock Market BIST 30 Index using Deep Learning," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Gelistirme Dergisi*, pp. 253-265, 2019. doi:10.29137/umagd.425560.
- [16] V. D. Ta, C. M. Liu, and D. A. Tadesse, "Portfolio Optimization-Based Stock Prediction Using Long-Short Term Memory Network in Quantitative Trading," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, p. 437, 2020.
- [17] W. Lu, J. Li, Y. Li, A. Sun, and J. Wang, "A CNN-LSTM-Based Model to Forecast Stock Prices," *Complexity*, vol. 2020, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- [18] C. Yang, J. Zhai, and G. Tao, "Deep Learning for Price Movement Prediction Using Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-13, 2020.
- [19] R. Chandra and Y. He, "Bayesian neural networks for stock price forecasting before and during COVID-19 pandemic," *Plos One*, vol. 16, no. 7, pp. 1-25, 2021.
- [20] U. Demirel, H. Çam, and R. Ünlü, "Predicting Stock Prices Using Machine Learning Methods and Deep Learning Algorithms: The Sample of the Istanbul Stock Exchange," *Gazi University Journal of Science*, vol. 34, no. 1, pp. 63-82, 2021. doi:10.35378/gujs.679103
- [21] N. Jing, Q. Liu, and H. Wang, "Stock price prediction based on stock price synchronicity and deep learning," *International Journal of Financial Engineering*, vol. 8, no. 2, 2021.
- [22] X. Yan, W. Weihan, and M. Chang, "Research on financial assets transaction prediction model based on LSTM neural network," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 257-270, 2021.
- [23] H. Lin, C. Chen, G. Huang, and A. Jafari, "Stock price prediction using Generative Adversarial Networks," *Journal of Computer Science*, vol. 17, no. 3, pp. 188-196, 2021.
- [24] T. T. H. Giang, T. T. Nguyen, and Q. T. Le, "Dynamic Sliding Window and Neighborhood LSTM-Based Model for Stock Price Prediction," *SN Computer Science*, vol. 3, no. 3, 2022.
- [25] F. Han, X. Ma, and J. Zhang, "Simulating Multi-Asset Classes Prices Using Wasserstein Generative Adversarial Network: A Study of Stocks, Futures and Cryptocurrency," *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 15, no. 1, p. 26, 2022.
- [26] H. Liu, L. Qi, and M. Sun, "Short-Term Stock Price Prediction Based on CAE-LSTM Method," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, no. 1, pp. 1-7, 2022.

- [27] E. Albayrak ve N. Saran, "İstatistiksel ve Derin Öğrenme Modellerini Kullanarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, no. 16, vol. 2, pp. 161-169, 2023. doi:10.54525/tbbmd.1031017
- [28] Ç. Çoban ve E. Hayat, "Hisse Senedi Piyasası Analizinde Farklı Derin Sinir Ağı Modellerinin Karşılaştırılması," *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, no. 10, vol. 2, pp. 120-139, 2023. doi:10.30803/adusobed.1402228
- [29] İ. Dalkıran ve M. Ozan, "Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Borsadaki Hisse Değerlerinin Tahmin Edilmesi," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 39, oo. 143-148, 2022. doi:10.31590/ejosat.1145949
- [30] C. Erden, "Derin Öğrenme ve ARIMA Yöntemlerinin Tahmin Performanslarının Kıyaslanması: Bir Borsa İstanbul Hissesi Örneği," *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, no. 30, vol. 3, pp. 419-438, 2023. doi:10.18657/yonveek.1208807
- [31] R. Mo, "Review of neural network algorithm and its application in reactive distillation," *Asian Journal of Chemical Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 20-29, 2021. doi:10.9734/ajocs/2021/v9i319073
- [32] K. Saini, N. Kumar, B. Bhushan, and R. Kumar, "Nonlinear complex dynamic system identification based on a novel recurrent neural network," *Springer Nature*, vol. 1, no. 1, 2023. doi:10.21203/rs.3.rs-2894875/v1
- [33] M. Safdar, "Feasibility of wildlife conservation based on artificial neural network," *Nature Environmental Protection*, vol. 1, no. 3, 2020. doi:10.38007/nep.2020.010304
- [34] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.
- [35] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, *Deep Learning*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016.
- [36] J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview," *Neural Networks*, vol. 61, pp. 85-117, 2015.
- [37] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature*, vol. 323, no. 6088, pp. 533-536, 1986.
- [38] M. Abadi, P. Barham, J. Chen, Z. Chen, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, G. Irving, M. Isard, M. Kudlur, J. Levenberg, R. Monga, S. Moore, D. Murray, B. Steiner, P. Tucker, V. Vasudevan, P. Warden, and M. Wicke, "TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning," in *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16)*, Nov. 2-4, 2016, Savannah, GA, USA [Online]. Available: USENIX. [Accessed: Mar. 10, 2023].
- [39] F. Chollet, "Keras," Available: <https://github.com/fchollet/keras> [Accessed: May 10, 2023].
- [40] A. Paszke, S. Gross, F. Massa, A. Lerer, J. Bradbury, G. Chanan, T. Killeen, Z. Lin, N. Gimelshein, L. Antiga, A. Desmaison, A. Kopf, E. Yang, Z. DeVito, M. Raison, A. Tejani, S. Chilamkurthy, B. Steiner, L. Fang, J. Bai, and S. Chintala, "PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 8026-8037, 2019.
- [41] Y. Jia, E. Shelhamer, J. Donahue, S. Karayev, J. Long, R. Girshick, S. Guadarrama, and T. Darrell, "Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding," in *Proceedings of the 22nd ACM Int. Conf. on Multimedia*, Nov. 3-7, 2014, Orlando, FL, USA, Eds. ACM, 2014. pp. 675-678.
- [42] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997.
- [43] S. Borovkova and I. Tsiamas, "An ensemble of LSTM neural networks for high-frequency stock market classification," *Journal of Forecasting*, vol. 38, no. 6, pp. 600-619, 2019.
- [44] Z. Jin, Y. Yang, and Y. Liu, "Stock closing price prediction based on sentiment analysis and LSTM," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 13, pp. 9713-9729, 2020.
- [45] A. Amidi and S. Amidi, "Recurrent Neural Networks cheatsheet," Available: <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-230/cheatsheet-recurrent-neural-networks> [Accessed: March 9, 2023].
- [46] K. Cho, V. Merriënboer, C. Gulcehre, D. Bahdanau, F. Bougares, H. Schwenk, and Y. Bengio, "Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation," *ArXiv.org*, 2014.
- [47] M. A. Kızrak and B. Bolat, "Uçak Motoru Sağlığı için Uzun-Kısa Süreli Bellek Yöntemi ile Öngörücü Bakım," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, pp. 103-109, 2019.
- [48] J. Chung, C. Gulcehre, K. Cho, and Y. Bengio, "Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling," *ArXiv.org*, 2014.
- [49] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, "Generative Adversarial Networks," *ArXiv.org*, 2014.
- [50] L. Lan, L. You, Z. Zhang, Z. Fan, W. Zhao, N. Zeng, Y. Chen, and X. Zhou, "Generative Adversarial Networks and Its Applications in Biomedical Informatics," *Frontiers in Public Health*, vol. 8, p. 164, 2020.
- [51] A. You, J. K. Kim, I. H. Ryu, and T. K. Yoo, "Application of generative adversarial networks (GAN) for ophthalmology image domains: a survey," *Eye and Vision*, vol. 9, no. 1, 2022.

- [52] K. Wang, C. Gou, Y. Duan, Y. Lin, X. Zheng, and F. Y. Wang, "Generative adversarial networks: introduction and outlook," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 4, pp. 588-598, 2017.
- [53] T. Salimans, I. Goodfellow, W. Zaremba, V. Cheung, A. Radford, and X. Chen, "Improved Techniques for Training GANs," *ArXiv.org*, 2016.
- [54] M. Arjovsky, S. Chintala, and L. Bottou, "Wasserstein GAN," *ArXiv.org*, 2017.
- [55] Alphabet Inc. "Alphabet Inc. (GOOG) Stock Price, News, Quote and History - Yahoo Finance," Available: <https://finance.yahoo.com/quote/GOOG/> [Accessed: March 9, 2023].
- [56] B. Banushev, "Using the latest advancements in AI to predict stock market movements," Available: <https://github.com/borisbanushev/stockpredictionai> [Accessed: March 9, 2023].
- [57] R. Dash, P. K. Dash, and R. Bisoi, "A self-adaptive differential harmony search based optimized extreme learning machine for financial time series prediction," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 19, pp. 25-42, 2014.
- [58] T. Fischer and C. Krauss, "Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions," *European Journal of Operational Research*, vol. 270, no. 2, pp. 654-669, 2018.
- [59] I. Sutskever, O. Vinyals, and Q. V. Le, "Sequence to sequence learning with neural networks," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 3104-3112, 2014.
- [60] J. Sirignano and R. Cont, "Universal features of price formation in financial markets: perspectives from Deep Learning," *Quantitative Finance*, vol. 19, no. 8, pp. 1449-1459, 2018.
- [61] F. A. Gers, J. Schmidhuber, and F. Cummins, "Learning to forget: Continual prediction with LSTM," *Neural Computation*, vol. 12, no. 10, pp. 2451-2471, 2002.
- [62] J. Lv, C. Wang, W. Gao, and Q. Zhao, "An Economic Forecasting Method Based on the LightGBM-Optimized LSTM and Time-Series Model," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2021, pp. 1-10, 2021.
- [63] F. J. Huang, W. Zhang, and T. Yoshida, "A hybrid model for stock price prediction," *Quantitative Finance*, vol. 18, no. 12, pp. 2001-2016, 2018.
- [64] W. Zhang and T. Yoshida, "Stock price prediction based on generative adversarial network," *Procedia Computer Science*, vol. 169, pp. 101-108, 2020.
- [65] I. Gulrajani, F. Ahmed, M. Arjovsky, V. Dumoulin, and A. Courville, "Improved Training of Wasserstein GANs," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, pp. 5767-5777, 2017.
- [66] J. Y. Zhu, T. Park, P. Isola, and A. A. Efros, "Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks," in *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Oct. 22-29, 2017, Venice, Italy [Online]. Available: IEEE Xplore. [Accessed: Mar. 9, 2023].
- [67] J. Xu, J. He, J. Gu, H. Wu, L. Wang, Y. Zhu, T. Wang, X. He, and Z. Zhou, "Financial Time Series Prediction Based on XGBoost and Generative Adversarial Networks," *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 16, pp. 637-645, 2022.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Investigation of the Effects of Topology Optimization Methods on Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicle Design

Erdem GÜNEY<sup>a</sup>, Gültekin UZUN<sup>b</sup>

Submitted: 20.07.2024 Revised: 25.11.2024 Accepted:25.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR04

### ABSTRACT

Lightweight structure designs using topology optimization attract attention in the aviation industry due to their mass properties. When the studies on this subject are examined, it is seen that the aim is to reduce the structure mass without changing the strength properties. Topology optimization methods are used to reduce the structure mass in the design of rotary-wing unmanned aerial vehicles, which are one of the types of aircraft and are increasingly used in the aviation industry due to their unique flight characteristics. Thanks to the application of these methods, the strength-to-weight ratio and efficiency of rotary wing unmanned aerial vehicles increase. In this study, studies in the literature on topology optimization of rotary wing unmanned aerial vehicles were investigated and the results obtained were presented. As a result of the research, it was determined that topology optimization methods affected the structure weight, structure stress and displacement value in the structure exposed to force in aerial vehicle design. In studies in the literature, it has been observed that two different strategies are used by researchers: optimization techniques that include a unit cell structure and optimization techniques that do not include a unit cell structure.

**Keywords:** Topology optimization, Rotary wing unmanned aerial vehicle, Unite cell structure, SIMP method, BESO method

<sup>a</sup> Gazi University,  
Graduate School of Natural and Applied  
Sciences,  
Dept. of Manufacturing Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2955-582  
e mail: erdem.guney@gazi.edu.tr

<sup>b</sup> Gazi University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Manufacturing Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-6820-8209  
e mail: uzun.gultekin@gazi.edu.tr

\*Corresponding author:  
erdem.guney@gazi.edu.tr

## Topoloji Optimizasyonu Yöntemlerinin Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Tasarımına Etkilerinin İncelenmesi

### ÖZ

Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen hafif yapı tasarımları kütle özelliklerinden dolayı havacılık sektöründe ilgi görmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde dayanım özellikleri değiştirilmeden yapı kütlelerinin azaltılmasının hedeflendiği görülmektedir. Hava aracı çeşitlerinden biri olan ve kendine özgü uçuş özelliklerine sahip olmasından ötürü havacılık sektöründe kullanım alanı giderek artan döner kanatlı insansız hava araçlarının tasarımında yapı kütlelerini azaltmak amacıyla topoloji optimizasyonu yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanması sayesinde döner kanatlı insansız hava araçlarının dayanım-ağırlık oranı ve verimi artmaktadır. Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava araçlarının topoloji optimizasyonu konusunda literatürde bulunan çalışmalar araştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yapılan araştırma sonucunda topoloji optimizasyonu yöntemlerinin hava aracı tasarımında yapı ağırlığını, yapı gerilimini ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerini etkilediği tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda araştırmacılar tarafından birim hücre yapısı içeren optimizasyon teknikleri ve birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon teknikleri olmak üzere iki farklı strateji kullanıldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Topoloji optimizasyonu, Döner kanatlı insansız hava araçları, Birim hücre yapısı, SIMP yöntemi, BESO yöntemi



## 1. Giriş (Introduction)

Üzerinde pilot bulunmaksızın uzaktan kontrol edilebilen veya otonom uçabilen ve tümleşik sistemlerin bir araya getirildiği hava aracı olarak tanımlanan insansız hava araçlarının (İHA) birçok sektörde etkin şekilde kullanıldığı görülmektedir. İHA çeşitlerinden biri olan döner kanatlı insansız hava araçları dikey kalkış yapabilmeleri, havada asılı kalabilmeleri (hovering), yüksek manevra kabiliyetine sahip olmaları, dar alanlara iniş yapabilmeleri, nispeten düşük maliyetli olmaları ve çok çeşitli alanlarda kullanılabilmesi nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekerek araştırma çalışmalarına konu olmaktadır. Döner kanatlı insansız hava araçları üzerinde yürütülen geliştirme çalışmaları sayesinde verimlilikleri ve uçuş menzilleri artmaktadır. Tüm hava araçlarında olduğu gibi döner kanatlı insansız hava araçlarında da hafiflik, darbe dayanımı, termal kararlılık, korozyona dayanıklılık ve maliyet konuları önem arz etmektedir. Bu nedenle hava araçlarında genel olarak karbon fiber, seramik elyaf, fiberglas gibi kompozit malzemeler; epoksi, polyester, fenol formaldehit gibi reçineler ve çeşitli termoplastik malzemeler tercih edilmektedir [1].

Hava araçlarında arzu edilen hafiflik ve dayanıklılık özellikleri, düşük özkütleyle sahip hammadde kullanılarak elde edilebileceği gibi tasarımsal iyileştirmeler yoluyla da elde edilebilmektedir. Tasarımda iyileştirme çalışmaları genel anlamda yapısal optimizasyon işlemleri olarak adlandırılmakta ve üç çeşit yapısal optimizasyon işlemi bulunmaktadır. Yapısal optimizasyon türleri olan boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu işlemleri sayesinde ürünlerin önceden belirlenmiş kriterleri karşılayacak şekilde en ideal yapıda tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır.

Boyut optimizasyonu işlemleri tasarımın geometrisinde herhangi bir değişiklik olmaksızın en uygun uzunluk ve kalınlık değerlerinin elde edilmesine olanak sağlarken şekil optimizasyonu işlemleri tasarımın boyutlarını değiştirmeden en uygun geometrilerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer bir yapısal optimizasyon çeşidi olan topoloji optimizasyonu ise belirli dayanım koşulları altında hem boyut hem de şekil bakımından en uygun yapının elde edilmesini sağlamaktadır.

Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen işlemlerin aynı zamanda boyut ve şekil optimizasyonunu da içeriyor olması sayesinde daha kapsamlı çalışmalar yürütülebilmektedir. Bu nedenle yapı tasarımında hafifliğin en önemli gereklilik olduğu durumlarda topoloji optimizasyonu işlemleri tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Topoloji optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen hafif yapı tasarımları başta havacılık sektörü olmak üzere birçok sektörde büyük ilgi görmektedir. Bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde dayanım özellikleri değiştirilmeden yapı kütlelerinin azaltılmasının hedeflendiği görülmektedir.

Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava araçları için hafif yapı tasarımları geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmaların sonuçları başlıklara ayrılarak değerlendirilmiştir.

## 2. Topoloji Optimizasyonu Yöntemleri (Topology Optimization Methods)

Bilgisayar teknolojisinin hızla gelişmesi ile birlikte bilgisayar programları çeşitlenmekte ve mühendislik problemlerinin çözümünde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin sıkça kullanıldığı alanlar arasında tasarım ve üretim süreçleri de yer almaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar sayesinde bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design - CAD) programları geliştirilmektedir.

Bilgisayar destekli tasarım programları temel olarak kullanıcının komutları doğrultusunda çeşitli geometrik şekillerin çizilebilmesini ve bu çizimlerin depolanabilir biçimde bellekler üzerine kaydedilmesini sağlamaktadır. Çizilen geometrik şekillerin birbirleriyle irtibatlandırılabilmesi ve boyutlarının belirlenebilmesi sayesinde nesnelerin ölçeklendirilmiş olarak bilgisayar ortamında tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca tasarımı yapılan bir nesnenin rengi, hammaddesi ve sertliği gibi fiziksel özellikleri tayin edilebilmektedir.

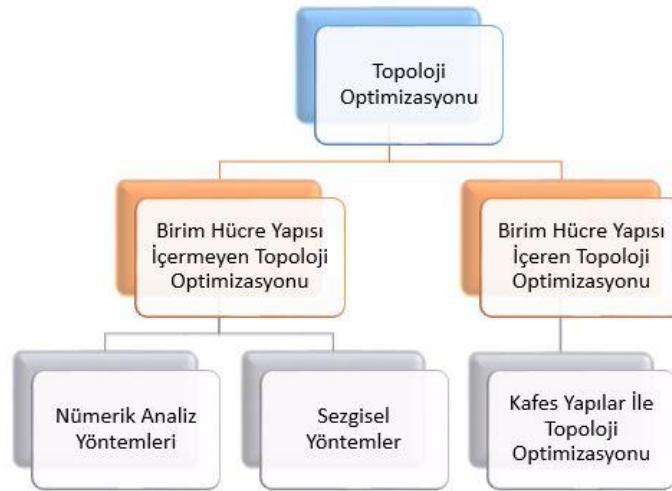
Üç boyutlu CAD programlarının çoğunda ayrıntılı matematiksel hesaplamalar yapabilmeyi sağlayan algoritmalar bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde nesnelerin fiziksel özellikleri ve tasarım

parametreleri kullanılarak dayanım analizleri, akış analizleri ve titreşim analizleri gibi birçok mühendislik hesaplamaları hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Bir tasarımın hedeflediği teknik özelliklerin elde edilebilmesini sağlamak için oldukça fazla sayıda parametrenin kontrol edilmesi ve en ideal değerlerin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle en uygun parametrelerin tespit edilebilmesini sağlamak amacıyla bazı CAD programlarında eniyileme (optimizasyon) algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde tasarımların topolojileri optimize edilebilmektedir.

Topoloji kavramı, tasarım terminolojisinde yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını temsil etmektedir. Topoloji optimizasyonu ise yapının içerisinde yer alan parçacık dağılımının düzenlenmesini ifade etmektedir. Topoloji optimizasyonu, var olan bir tasarımın yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirildiği için genellikle mevcut tasarımdaki yapı parçacıklarının konumları ve işlevsellikleri değerlendirme konusu olmaktadır. Bu parçacıkların yapı içerisindeki konumları ve işlevsellikleri CAD programlarında bulunan optimizasyon algoritmaları kullanılarak en ideal biçime kavuşturulmakta ve böylece topolojik bakımdan optimize edilmiş tasarımlar gerçekleştirilmektedir.

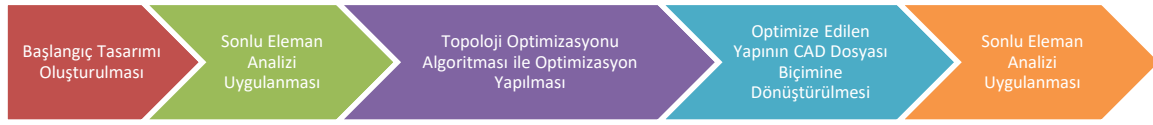
Bir tasarımın iç yapısı düzenlenirken tasarımın amaçları ve tasarıma etkiyen faktörler belirlenerek optimizasyon işleminde kriter olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tasarımların iç yapı düzenini optimize etmek amacıyla yapılan optimizasyon işlemleri, optimizasyon kriterlerine bağlı olarak birim hücre (kafes yapı) içeren veya birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonları olmak üzere iki gruba ayrılarak incelenmiştir. Literatürdeki çalışmaları incelemek için oluşturulan kavram haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Topoloji optimizasyonu kavram haritası  
(Topology optimization mind map)

## 2.1. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu (Topology optimization without unit cells)

Topoloji kavramı, tasarım terminolojisinde bir yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını temsil etmektedir. Topoloji optimizasyonu çalışmaları ile yapının parçacık dağılımı düzenlenmektedir. Yapıyı oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını düzenlemek üzere gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu işlemlerinde yapının maruz kaldığı çevresel koşullar belirlenerek en uygun yapı düzeni hesaplanmaktadır. Yapının maruz kaldığı kuvvetler, momentler veya burkulmalar gibi çevresel koşullar nedeniyle oluşan iç gerilimler optimizasyon algoritmaları aracılığıyla tespit edilmekte ve içyapı düzeni değiştirilerek optimize edilmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu işlemlerinde malzemenin içyapı düzeni optimizasyon algoritması tarafından çevresel koşullara göre belirlenmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu süreci Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu süreci  
(Topology optimization process that do not include unit cell)

Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin çözüme ulaşma sistemleri, nümerik analiz gibi iteratif çözümleme teknikleri veya yapay zekâ gibi sezgisel teknikler olmak üzere iki farklı stratejiyi kullanarak çalışmaktadır.

### 2.1.1 Nümerik analiz yöntemleri (Numerical analysis methods)

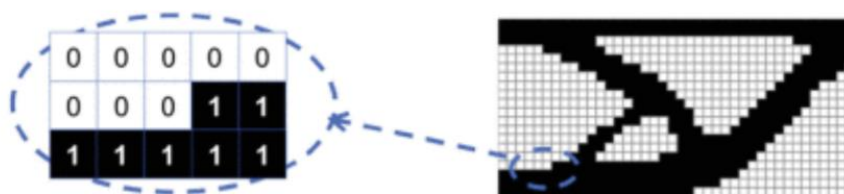
Topoloji optimizasyonu işlemi, var olan bir tasarımın yapısal özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirildiği için genellikle mevcut tasarımdaki parçacıkların konumları ve işlevsellikleri değerlendirme konusu olmaktadır. Mevcut bir tasarımda yer alan içyapı parçacıklarının konumlarını düzenlemek amacıyla çeşitli nümerik analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Tasarım sürecinde eniyileme yapabilmek amacıyla kullanılan nümerik analiz yöntemleri arasında Doğrusal Programlama Yöntemleri (Simplex Yöntemi ve Tam Sayılı Programlama Yöntemi), Doğrusal Olmayan Programlama Yöntemleri (Kesen Düzlem yöntemi, Geometrik Programlama Yöntemi, İkinci Derece Programlama Yöntemi ve Cezalandırma Yöntemi) ve Ayrık Programlama Yöntemleri bulunmaktadır [2].

Birçok CAD programında topoloji optimizasyonu işlemleri için Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme (Solid Isotropic Material with Penalization - SIMP) yöntemi tercih edilmektedir. Yapısal topoloji optimizasyonu için en yaygın kullanılan metodolojiler, Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme (SIMP) yöntemini içeren yoğunluğa dayalı yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır [3].

Yoğunluğa dayalı yöntemler, her bir elemanın katı malzemeden mi yoksa boşluktan mı oluşması gerektiğini belirleyerek bir amaç fonksiyonunu en aza indirme temel amacı ile sonlu elemanlardan oluşan sabit bir alan üzerinde çalışmaktadır [3].

Yoğunluğa dayalı yöntemlerden biri olan SIMP metodu, temel olarak çeşitli yüklere, sınır koşullarına ve kısıtlamalara maruz kalan bir parça üzerinde malzemeyi en optimum şekilde dağıtmayı, böylece parçanın önceden tanımlanmış kısıtlamaları ihlal etmeden bir optimizasyon hedefini karşılama amaçlayan yoğunluk tabanlı bir topoloji optimizasyonu yöntemidir [4]. Bu yöntemde parçaya etkileyen dış kuvvetlerin ve sınırlılıkların meydana getirdiği gerilmeler öncelikle sonlu eleman analizi ile tespit edilmekte ve sonrasında sonlu elemanlara etkileyen gerilme değerlerine bağlı olarak her bir eleman için yoğunluk katsayısı değeri belirlenmektedir. Yoğunluk katsayısı değerleri 0 ile 1 arasında olacak şekilde tanımlanmaktadır. Herhangi bir elemanın sıfır değerini alması, elemanın yoğunluğunun olmadığı anlamına gelmektedir. Yoğunluğu sıfır olan elemanlar yok sayılarak parça yapısından çıkarılmakta ve böylece fonksiyonel elemanlardan oluşan içyapı düzeni elde edilmektedir. Elemanlara atanan yoğunluk katsayıları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Elemanlara tanımlanan yoğunluk katsayıları [5]  
(Density coefficients defined for elements)

SIMP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu esnasında algoritma tarafından sıfır yoğunluk değeri verilerek yok sayılan sonlu elemanlar yapıdan silindiği için işlem sonucunda elde edilen yapıda pürüzlü bir yüzey durumu meydana gelmektedir. Silinen sonlu elemanların boyutlarına bağlı olarak yüzey durumunun çözünürlüğü değişkenlik göstermektedir. Küçük boyutlu elemanlar kullanılarak çözünürlük kalitesi artırılabilen fakat bu durum daha fazla sayıda eleman hesaplamasına neden olup işlem süresini uzatmaktadır.

Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen boşluklu yapıların genellikle düzenlenmesi ve kullanılabilir CAD dosyası formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Optimizasyon işleminin gerçekleştirildiği yazılımın imkân ve kabiliyetlerine bağlı olarak dosya dönüşümü aynı yazılım içerisinde veya başka yazılımlardan yararlanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bir kol modelinin optimizasyon işlemi öncesindeki görünümü, optimizasyon sonrasındaki görünümü ve dosya dönüşümü sonrasındaki görünümü Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Dosya dönüşümü a) başlangıç modeli b) optimize edilen model c) CAD dosyasına dönüştürülen model  
(File conversion a) initial model b) optimized model c) model converted to CAD file)

### 2.1.2. Sezgisel yöntemler (Heuristics methods)

Amacın kesin çözüm elde etmek olmadığı, çözüme yakın değerlerin elde edilmesinin sonuç için yeterli olduğu büyük boyutlu optimizasyon problemleri için sezgisel optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Sezgisel yöntemler; sürü tabanlı fizik tabanlı, biyoloji tabanlı, sosyal tabanlı, kimya tabanlı ve müzik tabanlı olmak üzere altı farklı grupta incelenmektedir. Ayrıca bu yöntemlerin birleşimi ile oluşturulmuş melez yöntemler de bulunmaktadır [6].

Doğadaki canlıların çevre koşullarına adaptasyon yeteneklerine bağlı olarak hayatta kalabilmeleri ve nesillerini devam ettirebilmeleri biyoloji biliminde doğal seçim olarak adlandırılmaktadır. Çevreye en iyi şekilde uyum sağlayan canlıların popülasyonunda artış gerçekleşirken uyum sağlayamayan veya nispeten az uyum sağlayan canlıların popülasyonunda ise azalış meydana gelmektedir. Bu durum doğanın kendi kendine gerçekleştirdiği evrimsel bir optimizasyon olarak değerlendirildiğinde biyoloji tabanlı sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ilham kaynağı hakkında fikir edinilebilmektedir.

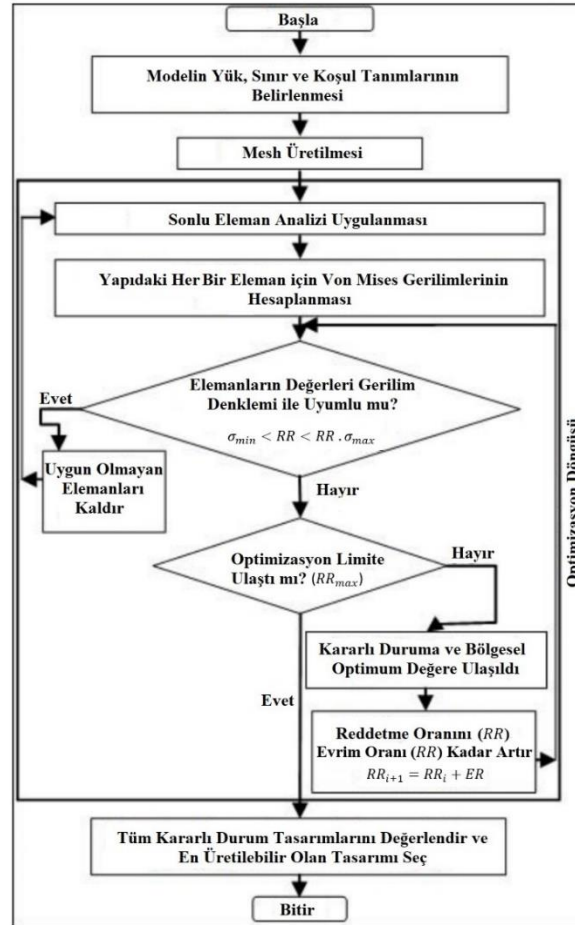
İlk olarak Xie ve Steven tarafından tanımlanan evrimsel yapı optimizasyonu (Evolutionary Structural Optimization - ESO) yöntemi, bir yapının en düşük gerilime sahip elemanlarını yavaş yavaş kaldırarak (hard-killing) optimuma doğru evrimleştiği basit ve ampirik bir kavrama dayanmaktadır [7].

Evrimsel yapı optimizasyonu yönteminde öncelikle modelin maruz kaldığı dış kuvvetler tanımlanmakta ve sonlu elemanların meydana getirilmesi için mesh oluşturulmaktadır. Tanımlanan koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirilerek elemanlara etkiyen gerilme ve yer değiştirme değerleri belirlenmektedir. Her bir elemanın sahip olduğu değerlerin teker teker kontrol edilmesi için döngü başlatılmaktadır.

Evrimsel yapı optimizasyonunda başlangıç reddetme oranı ( $RR_0$ ) ve evrim oranı ( $ER$ ) olmak üzere iki parametrenin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametrelerin tipik değerleri  $RR_0$  için %1 ve  $ER$  için %0,5 - %1 olarak kullanılmaktadır [8]. Başlangıç reddetme oranı kullanılarak döngünün ilk aşamasında elemanların gerilme değerleri kıyaslanmaktadır. Başlangıç reddetme oranına uygun olmayan elemanların tespit edilmesi durumunda bu elemanların reddedilmesi gerekmektedir.

Evrimsel süreçte yeni bir sonlu eleman ağı oluşturmaya gerek kalmamaktadır. Bunun yerine reddedilen elemanların malzeme özellik numarası sıfıra atanabilmekte ve küresel sertlik matrisi birleştirildiğinde bu unsurlar göz ardı edilmektedir. Ayrıca sonlu elemanların elastikiyet modülü, kalınlık veya yoğunluk gibi özelliklerinden birini azaltarak da elemanın göz ardı edilmesi sağlanabilmektedir [8]. Böylece elemanlar sistemden tamamen çıkarılmayıp geçici olarak yok sayılmakta, en uygun değere ulaşıncaya kadar kullanılabilir durumda bekletilmektedir.

Sonlu eleman analizi ve eleman çıkarma işleminde döngü boyunca aynı değerler kullanılarak karşılaştırma işlemi tekrarlanmaktadır. Kararlı bir duruma ulaşıldığında reddedilebilecek daha fazla öğenin olmadığı anlamına gelmekte ve reddetme oranına evrim oranı eklenerek sonraki döngü için yeni bir reddetme oranı belirlenmektedir. Böylece tüm kararlı durumlar değerlendirilmekte ve optimum sonuca yaklaşılmaktadır. Evrimsel yapı optimizasyonunun işlem basamakları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Evrimsel yapı optimizasyonu algoritması [8]  
(Evolutionary structure optimization algorithm)

Evrimsel yapı optimizasyonu yönteminin çift yönlü çalışabilen gelişmiş çeşitleri bulunmaktadır. Çift yönlü evrimsel yapısal optimizasyon (Bidirectional Evaluational Structural Optimization - BESO) yönteminde, yapının elemanları eklenebilmekte veya çıkarılabilmektedir [9].

Çift yönlü evrimsel yapı optimizasyonu yönteminde yapının işgal edebileceği maksimum izin verilen etki alanı belirlendikten sonra sonlu eleman ağı oluşturulmakta ve sınır koşulları tanımlanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmektedir. Sonlu eleman analizi sonucunda az gerilimli ve aşırı gerilimli elemanlar tespit edilmektedir. Elemanların sahip oldukları gerilme değerleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak değerlendirilmektedir. Gerilme değerlerinin Eşitlik 1 koşulunu sağlaması durumunda düşük gerilimli elemanlar yapıdan çıkarılmakta ve Eşitlik 2 koşulunu sağlaması durumunda ise yapıya eklenmektedir [9].

$$\sigma_e \leq RR \cdot \sigma_{max} \quad (1)$$

$$\sigma_e \geq IR \cdot \sigma_{max} \quad (2)$$

Eşitlik 1'de ve Eşitlik 2'de verilen  $\sigma_e$  ifadesi elemanın sahip olduğu gerilme miktarını,  $\sigma_{max}$  ifadesi yapıdaki en büyük gerilme miktarını,  $RR$  ifadesi reddetme oranını ve  $IR$  ifadesi ise dâhil etme oranını temsil etmektedir. Reddetme oranının hesaplanmasında kullanılan denklem Eşitlik 3'te verilmiştir.



$$RR = r_0 + r_1 \cdot SS + a_{RR} \cdot ON \quad (3)$$

Eşitlik 3'te verilen  $SS$  ifadesi kararlı durum sayısını temsil etmektedir. Ayrıca Evrim sürecindeki kararlı durumların yanı sıra yerel minimumları içeren tüm durumları gösteren bir tamsayı sayacı olarak kullanılmaktadır.  $ON$  ifadesi osilasyon sayısını temsil etmektedir. Osilasyon sayısı her yinelemede birer birer artmaktadır. Eşitlik 3'te yer alan  $r_0$  ifadesi başlangıç değeri olarak sıfır kabul edilmektedir. Aynı eşitlikte yer alan  $r_1$  ifadesi BESO yönteminde sayısal deneyimlerden elde edilen sabit sayıyı temsil etmekte ve normal değeri 0,001 kabul edilmektedir.  $a_{RR}$  ifadesi BESO yönteminde osilatör sayı sabitini temsil etmekte ve normal değeri 0,01 kabul edilmektedir. Eşitlik 3'te verilen reddetme oranı aynı zamanda  $0 \leq RR \leq 1$  koşulunu sağlamaktadır [9].

Eşitlik 2'de verilen dâhil etme oranının hesaplanmasında kullanılan denklem Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$IR = i_0 - i_1 \cdot SS - a_{IR} \cdot ON \quad (4)$$

Eşitlik 4'te yer alan  $i_0$  ifadesi başlangıç değeri olarak bir kabul edilmektedir.  $i_1$  ifadesi BESO yönteminde sayısal deneyimlerden elde edilen sabit sayıyı temsil etmekte ve normal değeri 0,01 kabul edilmektedir.  $a_{IR}$  ifadesi BESO yönteminde osilatör sayı sabitini temsil etmekte ve normal değeri 0,1 kabul edilmektedir. Eşitlik 4'te verilen dâhil etme oranı aynı zamanda  $0 \leq IR \leq 1$  koşulunu sağlamaktadır [9].

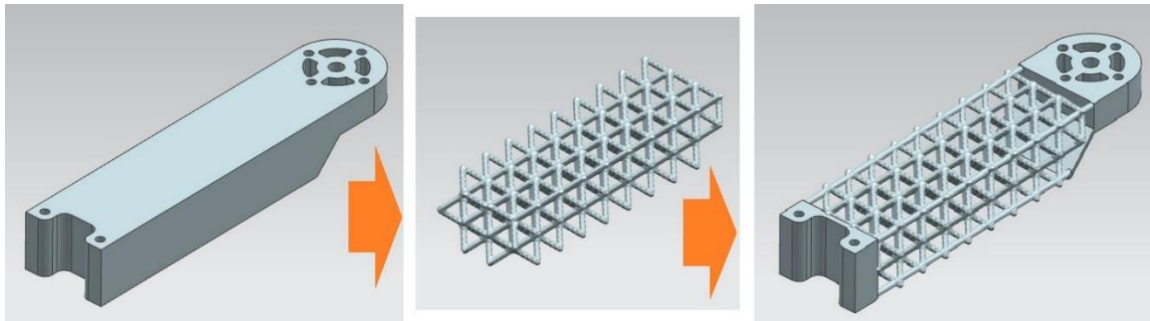
Tasarım alanındaki hiçbir öğenin karşılayamayacağı bir duruma ulaşıldığında Eşitlik 1 veya Eşitlik 2 için kararlı bir duruma ulaşıldığı sonucuna varılmaktadır. Optimizasyon sürecinin devam etmesi için kararlı durum sayacı 1 artırılmakta ve işlem tekrarlanmaktadır. Belirlenmiş olan minimum stres veya kriter limitlerine ulaşıncaya kadar döngü devam etmektedir [9].

## 2.2. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu (Topology optimization with unit cell)

Hüresel yapılar, stokastik veya periyodik hüresel yapılar olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Stokastik hüresel yapılar malzeme içerisinde düzensiz bir şekilde dağılım gösteren hücrelerden meydana gelmektedir. Periyodik hüresel yapılar ise malzeme içerisinde kafes adı verilen belirli bir hücre şeklinin ardışık olarak dizilmesi ile oluşturulmaktadır. Ardışık olarak dizilmiş olan ve birbirinin aynısı olan her bir hüresel yapıya birim hücre adı verilmektedir.

Yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılmakta olan birim hüresel yapılar, hava araçlarının verimliliğini geliştirebilecek olan performans-ağırlık oranını arttırmayı amaçlamaktadır [10]. Hüresel yapılar, üretim malzemesini yalnızca ihtiyaç duyulan yere koyarak malzeme ve imalat süresinden de tasarruf sağlamaktadır [10]. Bu yönüyle hüresel yapılar, malzemeyi oluşturan parçacıkların temas bölgelerini ve yapı içindeki dağılımlarını düzenleyerek topolojik açıdan optimizasyon sağlamaktadır. Hüresel yapılar kullanılarak üretilen gözenekli içyapılar ve optimize edilmiş geometriler, yüksek yük kapasitesi hedefleyen platformların ağırlığını azaltmakta ve yakıt verimliliğini artırmaktadır [11].

Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu işlemlerinde malzemenin içyapısı, optimizasyon işlemi için seçilen birim hücre geometrisi tarafından belirlenmektedir. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu işlemi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu işlemi  
(Topology optimization process performed using unit cell)



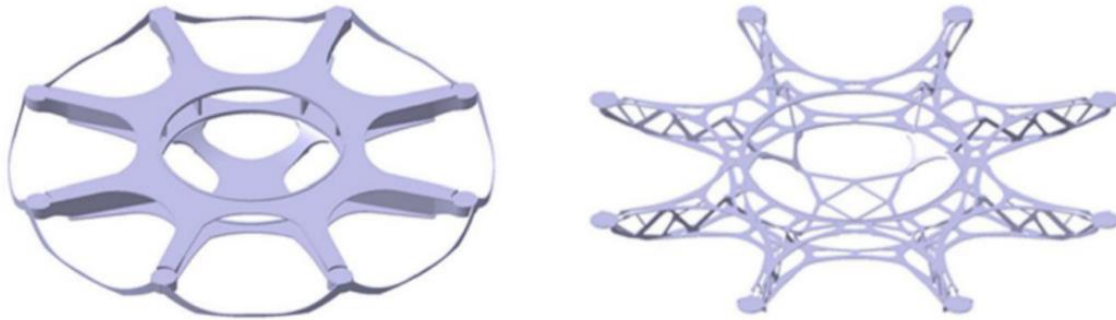
### 3. Topoloji Optimizasyonu Çalışmaları (Topology Optimization Studies)

Topoloji optimizasyonu konusunda yapılmış olan çalışmalar; birim hücre yapısı içermeyen çalışmalar ve birim hücre yapısı içeren çalışmalar olmak üzere iki başlık halinde gruplandırılarak incelenmiştir.

#### 3.1. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları (Topology optimization studies without unit cells)

Birim hücre yapısı içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları bilgisayar destekli mühendislik (Computer Aided Engineering - CAE) ve CAD programları bünyesinde bulunan optimizasyon araçları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalarda optimize edilecek parçaya etkiyen dış kuvvetlerin neden olduğu gerilme ve deformasyonlar dikkate alınarak yük taşıyan bölgeler tespit edilmekte ve sonrasında optimizasyon algoritması kullanılarak parçanın iç yapısı düzenlenmektedir.

Döner kanatlı insansız hava araçları üzerine yapılan birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde optimize edilecek yapı olarak genellikle gövde merkezi ve kol kirişi tasarımı konusunda daha çok çalışıldığı, spesifik parçaların ise nadiren optimize edildiği görülmektedir. Ayrıca döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birleşik gövde (monokok) ve montajlı gövde olmak üzere iki farklı yapı şeklinin bulunduğu görülmektedir. Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu yönteminin döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında kullanımı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Topoloji optimizasyonu uygulanan döner kanatlı insansız hava aracı gövdesi [12]  
(Rotary wing unmanned aerial vehicle body with topology optimization)

Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı konusunda literatürde bulunan ve birim hücre içermeyen çalışmalarda optimize edilen fonksiyonel parçaların dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

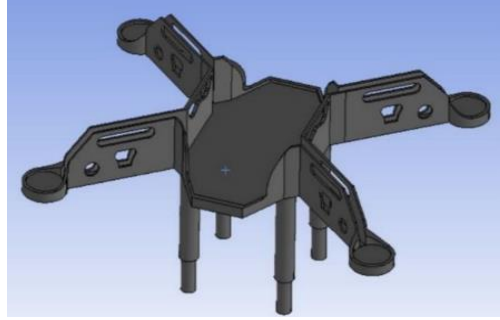
Tablo 1. Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birim hücre kullanılmadan optimize edilen parçalar (Optimized parts in rotary wing unmanned aerial vehicle design without using unit cells)

Parçalar	Literatürdeki Çalışmalar																
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
<b>Gövde Merkezi</b>	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓			✓	
<b>Kol Kirişi</b>	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
<b>Diğer Parçalar</b>					✓	✓					✓	✓		✓			

#### 3.1.1. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi (The effect of topology studies without unit cells on structure weight)

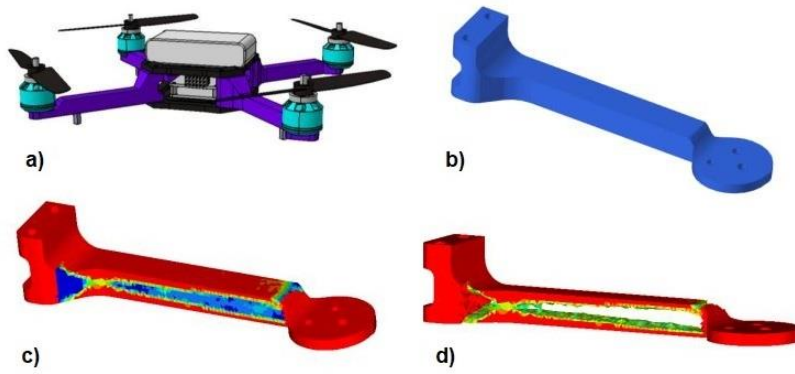
Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi incelendiğinde araştırmacıların tasarım kütlelerini azaltmayı hedefledikleri ve bu amaçla optimizasyon tekniklerinden faydalandıkları görülmektedir. Guo vd. [12] tarafından yapılan çalışmada hafif ve bakımı kolay bir İHA çerçevesi elde etmek için yeni bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Optimizasyon öncesinde model ağırlığının 5,846 kg olduğu, optimize edilmiş olan model ağırlığının ise

2,332 kg olduğu belirtilmiştir. Tasarımı tamamlanan İHA modelinin çarpışmaya dayanıklılık yanıtlarını elde etmek için sonlu elemanlar analizi kullanılarak düşme testi gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışma sonucunda dinamik düşme testi ile İHA çerçevesinin çarpışmaya dayanıklı olduğu bildirilmiştir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. Yapının iyileştirilmesinin ardından model kütlesinin 387,65 gramdan 342,56 grama düşürüldüğü belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım Şekil 8'de gösterilmiştir.



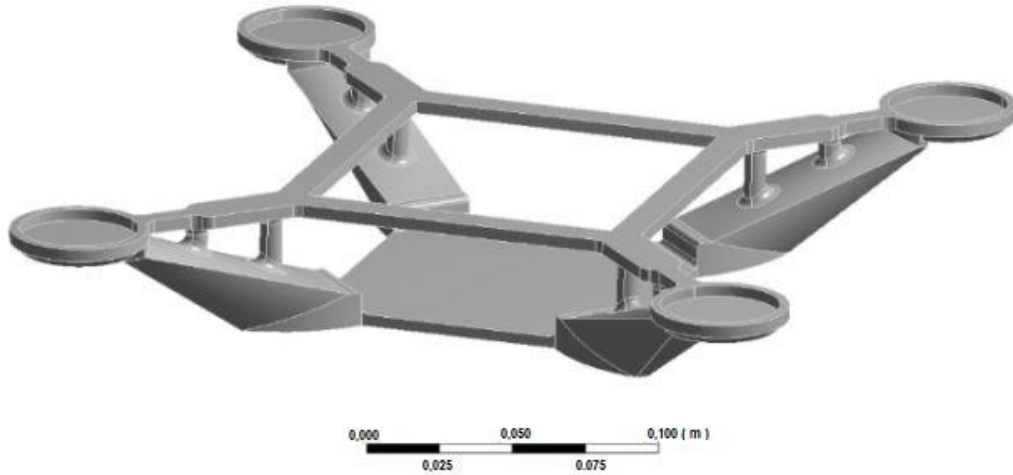
Şekil 8. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım [13]  
(The design obtained as a result of the optimization process)

Yapı vd. [14] tarafından yapılan çalışmada eklemeli üretim yoluyla topolojisi optimize edilmiş hafif bir mikro İHA yapısının sayısal tasarımı ve üretimi için bir çerçeve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Gereksinimlerine uygun bir yapıya ulaşabilmek için başlangıç tasarımı yapılmış ve ağırlığının 46 gram olduğu bildirilmiştir. Topoloji optimizasyonu Ansys Workbench 2020 R2 kullanılarak yapılmış ve optimizasyon işlemi birkaç kez gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen yapı 0,72 ve 0,96 mm olmak üzere iki farklı kalınlık değeriyle yeniden modellenmiş ve doğrulama testi için 3D yazıcı ile yazdırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sayısal ve deneysel veriler arasında yakın bir korelasyon elde edildiği belirtilmiştir. Gafurzade [15] tarafından yapılan çalışmada, tarımsal ilaçlama amacıyla üretilmiş olan ticari bir drone referans alınarak tasarlanan İnsansız hava aracına topoloji optimizasyonu uygulanarak hava aracının hafifletilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan modele ANSYS programında topoloji optimizasyonu uygulanmış ve gövde tasarım kütlesinin %52,4 oranında hafifletildiği belirtilmiştir. Klippstein vd. [16] tarafından insansız hava araçlarında boşluklu yapıların eklemeli imalat ile üretimi araştırılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı kullanılarak oluşturulan döner kanatlı insansız hava aracının kol braketleri parçası üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmış ve 25 yinleme sonucunda nihai tasarım elde edilmiştir. Yapılan deney sonucunda topoloji optimizasyonu uygulanan parçanın ilk duruma göre %49,2 daha hafif olduğu bildirilmiştir. Goh vd. [17] tarafından yapılan çalışmada tasarım optimizasyonu ve 3D baskı tekniği kullanılarak drone için bir güvenlik kafesinin tasarımı ve üretimi araştırılmıştır. Drone pervanelerinin çevreye çarparak zarar vermesini önlemek için güvenlik kafesi tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıya 20N kuvvet uygulayarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Analiz sonucunda tespit edilen kritik noktaları boyutlandırmak üzere Solidworks tasarım optimizasyonu aracı kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon işlemi uygulanarak hafifletilen tasarıma 60 metre yükseklikten serbest düşme testi uygulanmış ve yeterli miktarda darbe tamponlaması sağladığı belirtilmiştir. Yıldız [17] tarafından yapılan çalışmada drone kolunu optimize etmek için hibrit INFO benzetimli tavlama algoritması geliştirildiği belirtilmiş ve drone kolunun dayanım özelliklerini koruyarak parça ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Başlangıç ağırlığı 81,78 gram olarak ölçülen drone kolunun gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda yeni ağırlık değerinin 61,49 gram olarak ölçüldüğü ve ağırlıktaki azalma miktarının %24,8 olduğu belirtilmiştir. Yıldız tarafından tasarlanan drone'un üç boyutlu modeli, drone kolu ve optimizasyon uygulanan kol modeli Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Tasarlanmış olan a) drone modeli, b) drone kolu, c) topoloji optimizasyonu işlemi, d) optimize edilen kol modeli [17]  
(Designed a) drone model, b) drone arm, c) topology optimization process, d) optimized arm model )

Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada üç boyutlu model tasarımı, toplam çapı 770 mm olacak şekilde CATIA V5 programında gerçekleştirilmiştir. En iyi değerleri elde edebilmek için yakınsama doğruluğu %0,1 ve ceza faktörü 3 seçilerek ANSYS platformunda topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Uygulanan optimizasyon işlemi sonucunda yapının dayanım-ağırlık oranında yaklaşık %30 gelişme olduğu belirtilmiştir. Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Topoloji optimizasyonu işlemi ANSYS programında 35 yinleme ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımın başlangıç kütlelerinin 5,839 kg olduğu ve optimizasyon işleminden sonra yeni kütle değerinin 1,288 kg olduğu belirtilmiştir. Uygulanan topoloji optimizasyonu sayesinde tasarımın kütlelerinde yaklaşık %22,057 oranında azalma elde edildiği belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Optimizasyon işlemi için ANSYS programında yer alan Solid Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP) yöntemi tercih edilmiştir. Başlangıç ağırlığı 9,035 kg olan modelin gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonrasında ağırlığının 0,330 kg olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım Şekil 10'da gösterilmiştir.



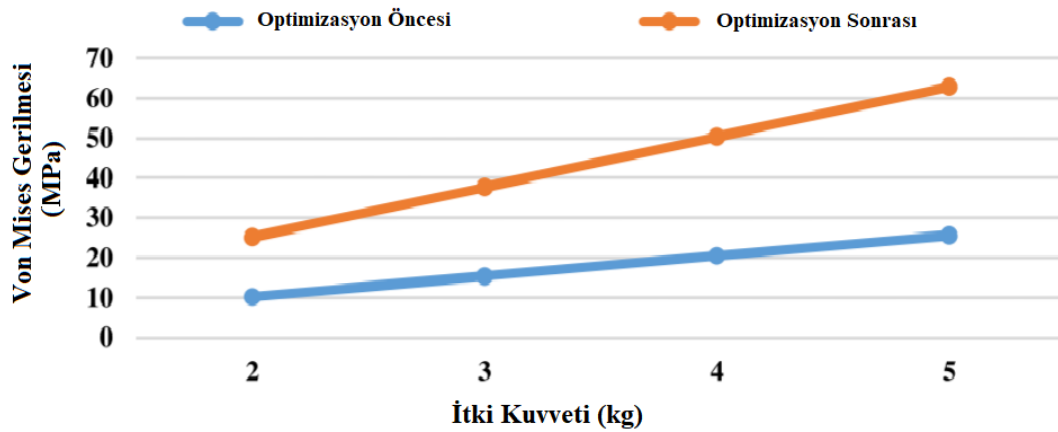
Şekil 10. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarım [21]  
(The design obtained as a result of the optimization process)

Prado [22] tarafından yapılan çalışma ile döner kanatlı insansız hava aracı gövdesinin üretim maliyetlerini azaltmak ve hafif bir yapı tasarlayarak verimliliği artırmak hedeflenmiştir. Uygulanan optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen tasarımların dayanım özelliklerini incelemek için Altair programı kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmış ve başlangıç kütlesi 675 gram olan gövde tasarımına uygulanan optimizasyon işlemleri sayesinde kütle miktarının %40 azaltıldığı belirtilmiştir. Khan vd. [23] tarafından yapılan çalışmada quadcopter insansız hava araçları için dayanıklı ve hafif iniş takımı tasarlanması amaçlanmıştır. Tasarımın kütlelerini azaltmak için Solidworks programında %15 oranında, %35 oranında ve %60 oranında olmak üzere üç farklı topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen tasarımların dayanım açısından insansız hava aracının çalışma koşullarına uygun olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört kollu küçük

bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin 66,158 gram ağırlığında olduğu bildirilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Modelin kütlelerini azaltmak için Inspire yazılımı kullanılmış ve değişken yoğunluk optimizasyonunu işlemi uygulanarak modelin kütlelerinin %51,5 oranında azaltıldığı belirtilmiştir. Natarajan [25] tarafından yapılan çalışma ile quadcopter insansız hava aracı için hafif yapı bileşenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Fusion 360 programında SIMP yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan hafifletme çalışması sonucunda motor montaj kollarının ağırlığında %31,6 azalma sağlandığı belirtilmiştir. Ali vd. [26] tarafından yapılan çalışmada dayanıklı ve hafif bir drone çerçevesi tasarlanması hedeflenmiştir. Model üzerinde nispeten az gerilme oluşan noktalardaki kütlelerin optimizasyon algoritması tarafından kaldırıldığı, optimizasyon işleminden sonra yeni kütle miktarının 406 gram olduğu ve kütledeki azalma oranının yaklaşık %50 olduğu bildirilmiştir.

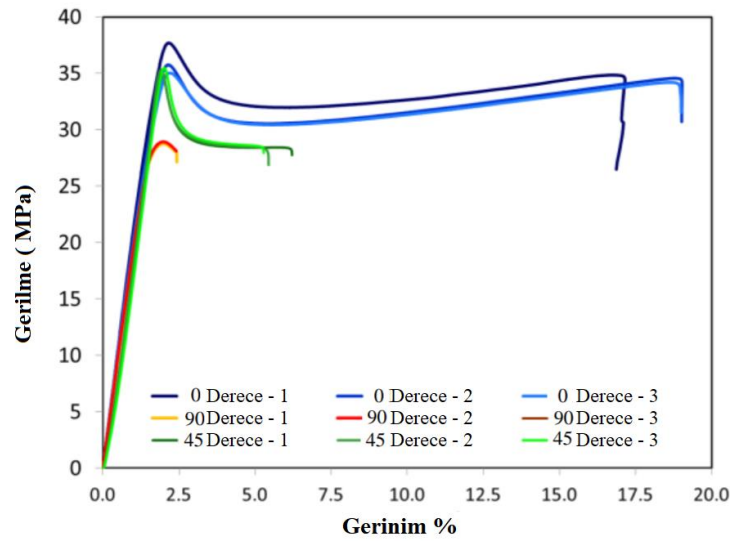
### 3.1.2. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapı gerilimine etkisi (The effect of topology studies without unit cells on structure stress)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapı gerilimine etkisi incelendiğinde araştırmacıların optimizasyon işlemi sonucunda meydana gelen yapısal gerilme miktarlarını analiz ettikleri görülmektedir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. İHA yapısının sonlu eleman analizi (FEA) için Polilaktik Asit (PLA) malzeme seçilmiştir. Toplam deformasyonu ve von-mises gerilimini belirlemek için ANSYS yazılımı kullanılarak İHA yapısı üzerinde statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. PLA malzeme kullanılarak tasarlanan modelin Von Mises gerilme değerinin 10,6 MPa olduğu belirtilmiştir. Mekanik mukavemetten ödün vermeden kütleli azaltmak ve stresi en aza indirmek için İHA yapısında topolojik optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen modelin Von Mises gerilme değerinin 25,62 MPa olduğu belirtilmiştir. İtki kuvvetinin yapı gerilmesine etkisi Şekil 11'de gösterilmiştir.



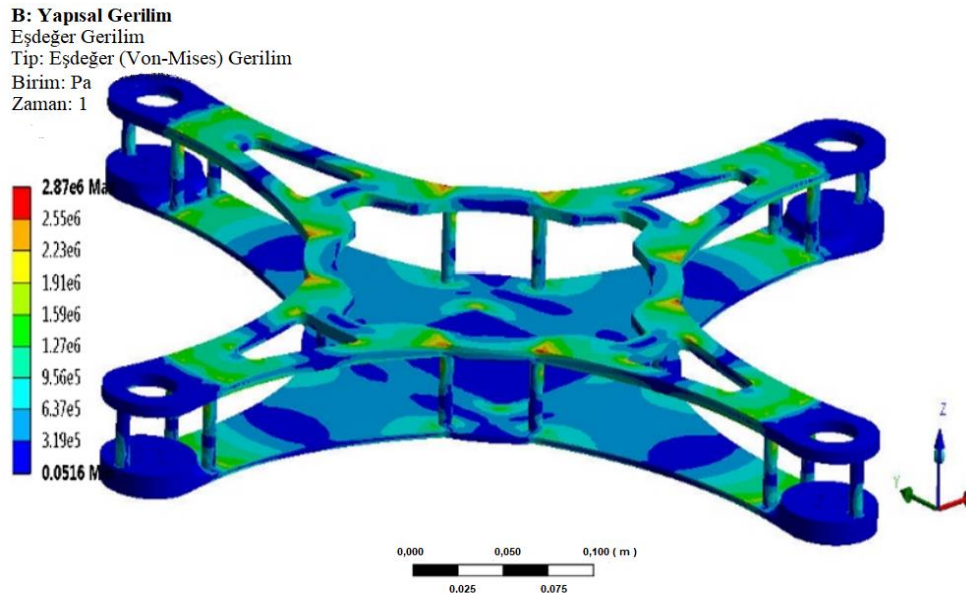
Şekil 11. İtki kuvvetinin yapı gerilmesine etkisi [13]  
(Effect of thrust force on structure stress)

Klippstein vd. [16] tarafından insansız hava araçlarında boşluklu yapıların eklemeli imalat yöntemi ile üretimi araştırılmıştır. Eklemeli üretim yöntemi olarak ergiyik biriktirme metodu (FDM) seçilmiş ve döner kanatlı insansız hava aracının kol braketi parçası üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Topoloji optimizasyonu uygulanan modelin eklemeli imalatında bal peteği yapısı, üçgen yapı ve dikdörtgen yapı olmak üzere üç farklı dolgu deseni kullanıldığı belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi sonuçlarına göre dolgu yoğunluğu azaldıkça Von-Mises gerilim değerinin arttığı bildirilmiştir. FDM numunelerinin gerilme-yer değiştirme grafiği Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Gerilme – gerinim grafiği [16]  
(Stress – strain graph)

Yıldız [18] tarafından yapılan çalışmada drone kolunu optimize etmek için hibrit INFO benzetimli tavlama algoritması geliştirildiği belirtilmiştir. Drone kolunun dayanım özelliklerini koruyarak parça ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. Optimizasyon öncesinde modele etkiyen kuvvetlerin neden olduğu maksimum gerilme değerinin 5,22 MPa olarak ölçüldüğü ve optimizasyon sonrasında ise maksimum gerilme değerinin 42,11 MPa olarak ölçüldüğü belirtilmiştir. Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada başlangıç modelinin gerilim değerinin 4,05 MPa olduğu belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu uygulanan tasarımın başlangıçtaki modellere uygulanan sınır koşulları altında sergileyeceği dayanım özelliklerini değerlendirebilmek amacıyla yeni tasarım için sonlu eleman analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda maksimum gerilme değerinin 2,87 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 13'te gösterilmiştir.

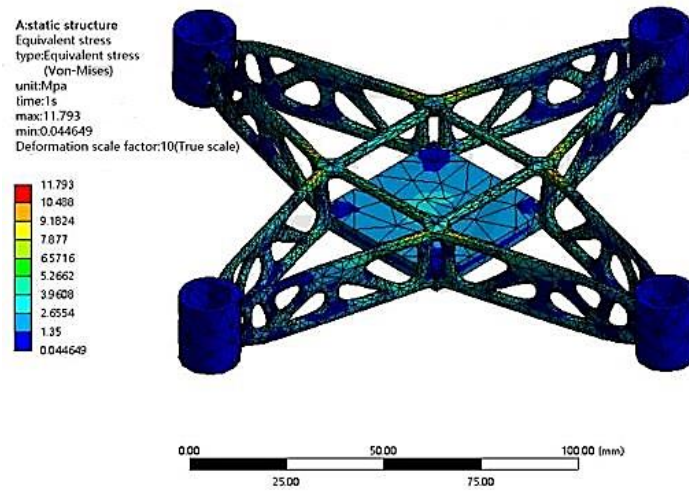


Şekil 13. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı [19]  
(Stress diagram obtained by finite element analysis)

Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. İnsansız hava aracının maruz kalacağı dış kuvvetlere karşı dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve maksimum gerilim miktarının 0,39 MPa olduğu belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu işlemi ANSYS programında 35 yineleme ile gerçekleştirilmiş ve yapıdaki maksimum gerilme değerinin ise 1,282 MPa olduğu



belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Belirlenen sınır koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirildikten sonra maksimum gerilme değerinin 0,1 MPa olduğu belirtilmiştir. Tanımlanan koşullar altında topoloji optimizasyonu işleminin 21 yinleme sonrasında final modele ulaştığı ve optimize edilen modelin maksimum gerilme değerinin 3,02 MPa olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört kollu küçük bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Seçilen malzemenin elastikiyet modülü 2000 MPa, poisson oranı 0,35 ve akma dayanımı 45 MPa olarak belirtilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Kuvvetler nedeniyle meydana gelen gerilme değerinin ise 2,838 MPa olduğu bildirilmiştir. İnspire yazılımı kullanılarak değişken yoğunluk optimizasyonunu işlemi uygulanmıştır. Optimize edilen modelin maksimum gerilme değerinin 11,793 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 14'te gösterilmiştir.



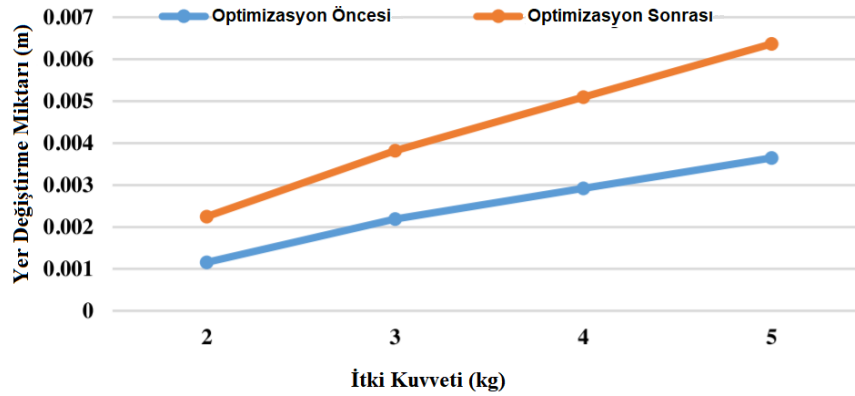
Şekil 14. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı [24]  
(Stress diagram obtained by finite element analysis)

Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilmiştir. Bu çalışma ile heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiş ve geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi ile karşılaştırılmıştır. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin Von-Mises gerilim değerlerinin ortalama 15,11 MPa olduğu belirtilmiştir. SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin Von-Mises gerilim değerlerinin ise ortalama 2,42 MPa olduğu belirtilmiştir.

### 3.1.1. Birim hücre içermeyen topoloji çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkisi (The effect of topology studies without unit cells on the amount of displacement in the structure)

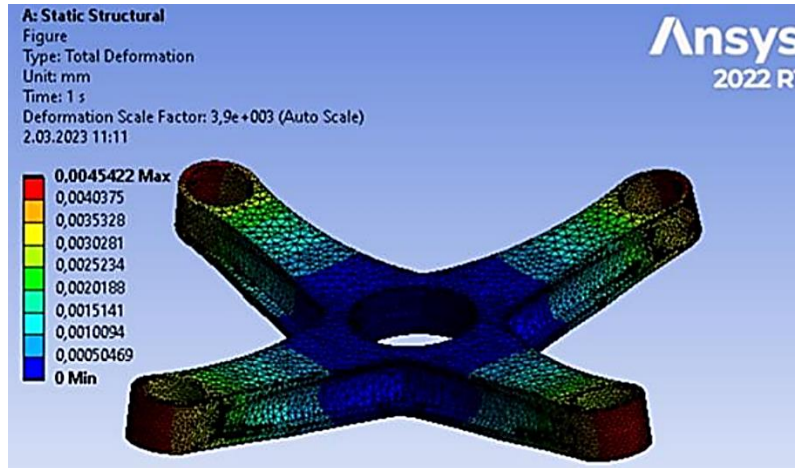
Döner kanatlı insansız hava araçlarında birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar yapı kütleindeki değişimin yer değiştirme miktarına etkisini incelemişlerdir. Rayed vd. [13] tarafından yapılan çalışmada İHA yapısının optimizasyonu, titreşim ve yorulma özelliklerinin simülasyon sonuçları ile değerlendirilmiştir. İHA yapısının FEA analizi için Polilaktik Asit (PLA) malzeme seçilmiştir. Toplam deformasyonu ve Von-Mises gerilimini belirlemek için ANSYS yazılımı kullanılarak İHA yapısı üzerinde statik yapısal analiz gerçekleştirilmiştir. PLA malzeme kullanılarak tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme değerinin 1,42 mm olduğu belirtilmiştir. Mekanik mukavemetten ödün vermeden kütleyi azaltmak ve stresi en aza indirmek için İHA yapısında topolojik optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 3,8 mm olduğu belirtilmiştir. İtke kuvvetinin yer değiştirme değerlerine etkisi Şekil 15'te gösterilmiştir.





Şekil 15. İtki kuvvetinin yer değiştirme değerlerine etkisi [13]  
(Effect of thrust force on displacement values)

Esakki vd. [19] tarafından quadrotor insansız hava aracı şasisinin dayanım-ağırlık oranını artırmak amacıyla yapılan çalışmada üç boyutlu model tasarımı, toplam çapı 770 mm olacak şekilde Catia V5 programında gerçekleştirilmiştir. Modelin dayanım özelliklerini incelemek için her bir motor yatağına 4,9 N kuvvet tanımlaması yapılarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının maksimum yer değiştirme değerinin 0,64 mm olduğu belirtilmiştir. Gerilme miktarı sınır koşul olacak şekilde İHA şasisinin hafifletilmesi amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimize edilen modelin dayanım özelliklerini değerlendirebilmek amacıyla yeni tasarım için sonlu eleman analizi uygulanmış ve analiz sonucunda maksimum yer değiştirme değerinin 2,3 mm olduğu belirtilmiştir. Yakın vd. [20] tarafından yapılan çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı şasisinin ağırlığını azaltmak hedeflenmiştir. İnsansız hava aracının maruz kalacağı dış kuvvetlere karşı dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve gövde üzerinde meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarının 0,00113 mm olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen yer değiştirme diyagramı Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Sonlu eleman analizi ile elde edilen yer değiştirme diyagramı [20]  
(Displacement diagram obtained by finite element analysis)

Tasarımın kütlesini azaltmak için topoloji optimizasyonu işlemi Ansys programında 35 yineleme ile gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen şasi tasarımının dayanım özelliklerini inceleyebilmek amacıyla üzerinde sonlu eleman analizi yapılmış ve maksimum yer değiştirme değerinin 0,00454 mm olduğu belirtilmiştir. Nvss vd. [21] tarafından yapılan çalışma ile iki kilogram kalkış ağırlığına sahip bir quadcopter insansız hava aracı gövdesinin hafif yapıda tasarlanması amaçlanmıştır. Belirlenen sınır koşullar altında sonlu eleman analizi gerçekleştirildikten sonra maksimum yer değiştirme değerinin 0,003 mm olduğu bildirilmiştir. Tanımlanan koşullar altında topoloji optimizasyonu işleminin 21 yineleme sonrasında final modele ulaştığı ve optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 0,14 mm olduğu belirtilmiştir. Xiang vd. [24] tarafından yapılan çalışmada hava fotoğrafçılığına yönelik dört rotorlu küçük bir İHA'nın gövde yapısı tasarlanmış ve gövde yapısının üç boyutlu modeli tasarlanmıştır. Seçilen malzemenin elastikiyet modülü 2000 MPa, poisson oranı 0,35 ve akma dayanımı 45 MPa olarak belirtilmiştir. Hava aracının kollarındaki fırçasız motorların monte

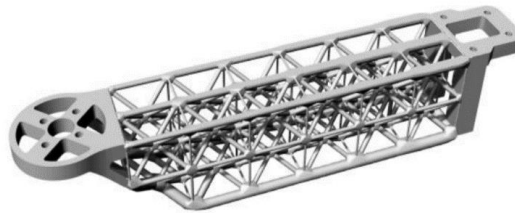
edildiği alanlara 19,11 N dikey kaldırma kuvveti uygulanmış ve sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Kuvvetler nedeniyle meydana gelen gerilme değerinin ise 0,39 olduğu bildirilmiştir. İnspire yazılımı kullanılarak değişken yoğunluk optimizasyonu işlemi uygulanmıştır. Optimize edilen modelin maksimum yer değiştirme değerinin 1,127 mm olduğu belirtilmiştir. Natarajan [25] tarafından yapılan çalışma ile quadcopter insansız hava aracı için hafif yapı bileşenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen hafifletme çalışması sonucunda motor montaj kollarının ağırlığında %31,6 azalma sağlandığında motor montaj kollarındaki yer değiştirme miktarının 4,151 mm olarak ölçüldüğü ve elde edilen yer değiştirme miktarının yeterli olduğu belirtilmiştir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilerek heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi de üretilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin yer değiştirme değerlerinin ortama 4,834 mm olduğu ve SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin yer değiştirme değerlerinin ise ortalama 0,354 mm olduğu belirtilmiştir.

### 3.2. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları (Topology optimization studies including unit cells)

Birim hücre yapısı içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları genellikle CAD programları bünyesinde bulunan kafes yapı araçları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kafes yapı araçları topolojik optimizasyon yaparken birim hücre şeklindeki yapıları yan yana ve üst üste dizerek içerisinde boşluklar bulunan bir iskelet sistemi oluşturmaktadır. Bu iskelet sistemi başlangıçta kalınlık değeri bulunmayan bir tel kafes şeklinde oluşturulmakta ve daha sonra gerekli kalınlık değeri tanımlanarak katı modele dönüştürülmektedir.

Bir parçaya birim hücre içeren topoloji optimizasyonu uygulanırken parçanın tamamında büyük boşluklar meydana gelmesi nedeniyle parçada yer alan bağlantı yüzeyleri, civata ve pim delikleri gibi fonksiyonel yüzeyler tecrit edilerek optimizasyon işleminden hariç tutulmaktadır.

Döner kanatlı insansız hava araçları için yapılan birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde genellikle giriş tasarımı konusunda optimizasyon yapıldığı, diğer parçaların ise nadiren optimize edildiği görülmektedir. Ayrıca döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarında genellikle farklı birim hücre yapılarının birbirleriyle mukayese edildikleri görülmektedir. Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu yönteminin döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında kullanımı Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Birim hücre yapısı kullanılarak tasarlanan döner kanatlı insansız hava aracı kolu [27]  
(Rotary wing unmanned aerial vehicle arm designed using unit cell structure)

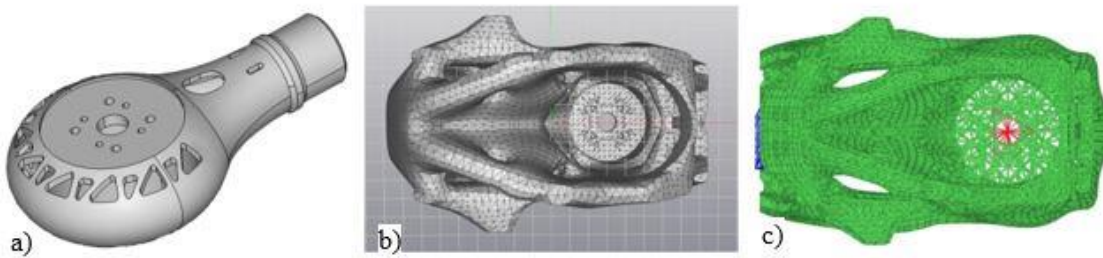
Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı konusunda literatürde bulunan ve birim hücre içeren çalışmalarda optimize edilen fonksiyonel parçaların dağılımı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Döner kanatlı insansız hava aracı tasarımında birim hücre kullanılarak optimize edilen parçalar (Parts optimized using unit cells in rotary wing unmanned aerial vehicle design)

Parçalar	Literatürdeki Çalışmalar										
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Gövde											
Merkezi											
Kol											
Kirişi	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Diğer											
Parçalar		✓		✓							

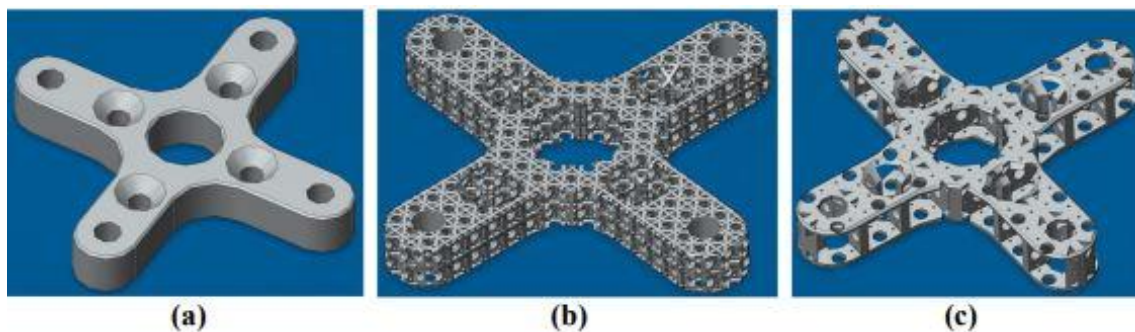
### 3.2.1. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapı ağırlığına etkisi (The effect of topology studies including unit cells on structure weight)

Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmalarının döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı ağırlığına etkisi incelendiğinde araştırmacıların tasarım kütlelerini azaltmayı hedefledikleri ve bu amaçla kafes yapıların dayanım özelliklerinden yararlandıkları görülmektedir. Sripada [28] tarafından yapılan çalışma ile sağlam ve hafif yapıya sahip drone motor montaj parçası tasarlanması hedeflenmiştir. Optimizasyon işlemi %25 ile %40 arasındaki hacim oranları için gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon işlemleri sonucunda %25 hacim oranına sahip modelin en uygun yapıda olduğu belirtilmiştir. Modelin iç yapısını kafeslerden oluşacak şekilde düzenleyebilmek için “nTopology” firması tarafından geliştirilen Element Pro yazılımı kullanılmıştır. Kenar uzunluğu 5 mm olan tetrahedral yapıya sahip bir kafes tasarımı yapılmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olacak şekilde üç farklı durum için kafes optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve modelin tamamen kafes yapıya sahip olması sağlanmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin kütlesi 224 gr, kafes kirişlerinin kalınlığı 1,5 mm olan modelin kütlesi 505,5 gr ve kafes kirişlerinin kalınlığı 2 mm olan modelin kütlesi ise 898,67 gr olarak belirtilmiştir. Optimizasyon süreci Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18. Optimizasyon süreci a) başlangıç modeli b) optimize edilen model c) kafes yapılı model [28]  
(Optimization process a) initial model b) optimized model c) lattice structure model)

Palomba vd. [29] ekosistem gözleminde kullanılmak üzere tasarlanan quadcopter dronlarda yenilikçi hafif tasarım çözümleri geliştirmek için yaptıkları çalışmada topolojik açıdan iki farklı birim hücre yapısını incelemişlerdir. Drone kollarının üretiminde F-RD kafes yapısının kullanılması durumunda ağırlığın 1,8 kg olacağı, HS kafes yapısının kullanılması durumunda ise ağırlığın 1,9 kg olacağını belirtmişlerdir. Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütlelerini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı “Lattice 202” olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı “Kafes 28” olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımı kütlelerinin 5 gram olduğu, Lattice 202 adlı kafeslerden oluşan yapı kütlelerinin 2,2 gram olduğu, yani gerçek tutucuya göre %56 daha az olduğu belirtilmiştir. Lattice 28 adlı kafeslerden oluşan yapı kütlelerinin 2 gram olduğu, yani başlangıç modeline kıyasla %60 daha az olduğu belirtilmiştir. Gerçekleştirilen tasarımlar Şekil 19’da gösterilmiştir.



Şekil 19. Tutucu tasarımları a) başlangıç modeli b) Lattice 202 modeli c) Lattice 28 modeli [30]  
(Holder designs a) starter model b) Lattice 202 model c) Lattice 28 model)

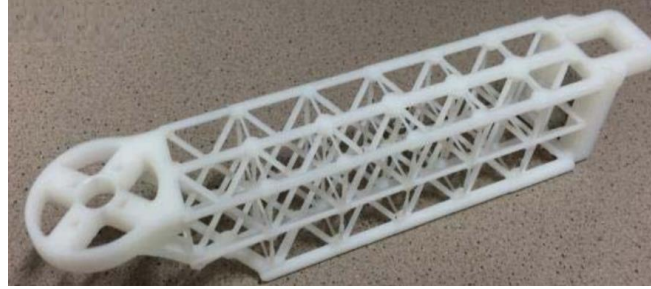
Wang ve Tamijani [31] tarafından yapılan çalışmada, bir quadcopter kolunun iç yapıları, kübik kafes ve sekizli kafes yapısı kullanılarak tasarlandıktan sonra geleneksel optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarına göre sekizli kafes yapısının kübik kafes yapısına oranla daha izotropik davranış sergilediği belirtilmiştir. Periyodiklik parametresi 0,9 olduğunda ön görülen hacim oranının %34,11 olduğu belirtilmiştir. Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin ağırlığı 79,8 gram, Sınıf-P numunenin ağırlığı 78,1 gram ve Sınıf-IWP numunenin ağırlığı 79,6 gram olarak belirtilmiştir. Oliveira ve Carvalho [33] tarafından yapılan çalışmada çok rotorlu bir drone'un iskeletini üretmek için tüketici sınıfı eklemeli imalat malzemelerinin kullanılmasının uygulanabilirliğini değerlendirmek ve mekanik performansını incelemek amaçlanmıştır. Simülasyonlar ve sonlu eleman analizleri için ABS malzeme seçilmiştir. ABS malzemenin bükülme ve çekme dayanımlarının sırasıyla 19,73 MPa ve 14,5 MPa olduğu belirtilmiştir. Aynı dış görünüme sahip fakat üst düzlem ile alt düzlem arasındaki bölgenin doldurulma şekli farklı olan dört çeşit tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımlar; içi tam dolu, içi boş, içi kafes dolgulu ve içi ızgara dolgulu olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Tam dolu modelin kütlesinin 333,38 g olduğu belirtilmiştir. İçi boş olan tasarımın kütlesinin 109,59 g olduğu, içi kafes dolgulu olan tasarımın kütlesinin 141,30 g olduğu ve içi ızgara dolgulu olan tasarımın kütlesinin 131,18 g olduğu belirtilmiştir. Zhang vd. [34] tarafından yapılan çalışmada, yeni bir kafes yapı oluşturulmuş ve geliştirilen yöntemin performansı, mevcut kafes yapı optimizasyonu yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, x-y düzlemindeki kafes özelliklerine odaklanıldığı belirtilmiş ve farklı hacim kesri kısıtlamalarına uygun olmak üzere üç kafes grubu, sırasıyla x eksen yönünde maksimum çekme modülüne, y eksen yönünde maksimum çekme modülüne ve x-y düzlemi içinde maksimum kesme modülüne sahip olacak şekilde topoloji optimizasyonu yoluyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kafes grupları farklı kombinasyonlar halinde birbirleriyle birleştirilerek çeşitli kafes yapı biçimleri elde edilmiştir. Çalışmada öngörülen destek ve yükleme koşulu altında yapısal deformasyonu en aza indiren malzeme yoğunluk dağılımını bulmayı amaçlayan minimum uyumluluk problemi araştırılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla giriş modeli üzerinde üç noktalı bükme deneyleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kütle hafifletme oranı %40 olarak belirlenerek optimize edilmiş olan giriş modellerinin üretiminde sıvı reçineyi katı yapılara dönüştüren eklemeli imalat yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Bükme testlerini kullanılacak olan her bir giriş modelinden 120x30x20 ebatlarında ikişer adet üretildiği ve bükme deneylerinin universal bir test cihazında 2 mm/s ilerleme hızıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Nihai tasarımın hacminin 48750 mm<sup>3</sup> olduğu ve ilk tasarıma göre %24,92 azalma gösterdiği bildirilmiştir. Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapısı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan girişler tasarlanmış ve girişlerin her biri kafes yapıları ile doldurularak sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet uygulanarak üç nokta bükme testi uygulayarak statik analiz gerçekleştirilmiştir. Kagome yapısının 54,7 N/gram değeri ile en yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip model olduğu belirtilmiştir.

### 3.2.2. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapı gerilimine etkisi (The effect of topology studies including unit cells on structure stress)

Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu çalışmalarının döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı gerilimine etkisi incelendiğinde araştırmacıların optimizasyon işlemi sonucunda meydana gelen yapısal gerilme miktarını analiz ettikleri görülmektedir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapıları için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilmiştir. Kafes çerçeve oluşturmak için hexahedron birim hücreler periyodik olarak dizilerek tasarım hacmi birim hücreler ile doldurulmuştur. Deney numuneleri üretmek üzere FDM yöntemi seçilmiştir. FDM yazıcısı olarak Zortrax M200, baskı malzemesi olarak ise Z-ABS tercih edilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin Von Mises gerilim değerlerinin ise ortalama 15,11 MPa olduğu belirtilmiştir. Optimizasyon işlemi sonrasında kafes yapıya

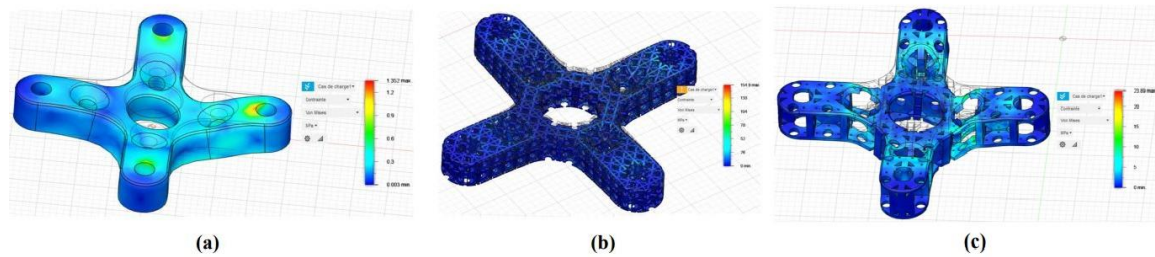


sahip numunelerin Von Mises gerilim değerlerinin ortama 4,351 MPa olduğu belirtilmiştir. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yapı Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen yapı [27]  
(Structure produced using the additive manufacturing method)

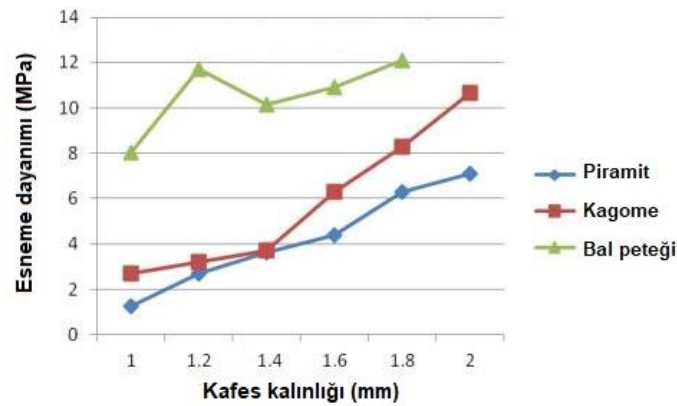
Palomba vd. [29] ekosistem gözleminde kullanılmak üzere tasarlanan quadcopter dronlarda yenilikçi hafif tasarım çözümleri geliştirmek için yaptıkları çalışmada topolojik açıdan iki farklı birim hücre yapısını incelemişlerdir. Deney numunelerinin üretiminde ergiyik biriktirme yöntemi (FDM) kullanılmış ve üretim malzemesi olarak polilaktik asit (PLA) tercih edilmiştir. Numunelere basma testleri 25 kN kapasiteli Italsigma marka test cihazı kullanılarak 2 mm/dak ve 5 mm/dak ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan basma testleri sonucunda F-RD kafes yapısına sahip numunelerin maksimum 4,5 MPa dayanım gösterdiği, HS kafes yapısına sahip numunelerin ise maksimum 4,0 MPa dayanım gösterdiği belirtilmiştir. Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütlesini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı "Lattice 202" olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı "Kafes 28" olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının gerilme değerinin 1,352 MPa olduğu, "Lattice 202" kafeslerden oluşan yapının gerilme değerinin 154,9 MPa olduğu ve "Lattice 28" kafeslerden oluşan yapının gerilme değerinin 23,89 MPa olduğu belirtilmiştir. Sonlu eleman analizi ile elde edilen gerilme diyagramı Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Analiz sonucunda elde edilen gerilme diyagramları a) başlangıç tasarımı b) Lattice 202 c) Lattice 28 [30]  
(Stress diagrams obtained by analysis a) initial design b) Lattice 202 c) Lattice 28)

Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Kafes yapılar, üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) türetilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin maksimum kuvveti 260,8 N, Sınıf-P numunenin maksimum kuvveti 231,4 N ve Sınıf-IWP numunenin maksimum kuvveti 171,4 N mm olarak belirtilmiştir. Oliveira ve Carvalho [33] tarafından yapılan çalışmada çok rotorlu bir drone'un iskeletini üretmek için tüketici sınıfı eklemeli imalat malzemelerinin kullanılmasının uygulanabilirliğini değerlendirmek ve mekanik performansını incelemek amaçlamıştır. Simülasyonlar ve sonlu eleman analizleri için ABS malzeme seçilmiştir. ABS malzemenin bükülme ve çekme dayanımlarının sırasıyla 19,73 MPa ve 14,5 MPa olduğu belirtilmiştir. Aynı dış görünüme sahip fakat üst düzlem ile alt düzlem arasındaki bölgenin doldurulma şekli farklı olan dört çeşit tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımlar; içi tam dolu, içi boş, içi kafes dolgulu ve içi ızgara dolgulu olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Tam dolu

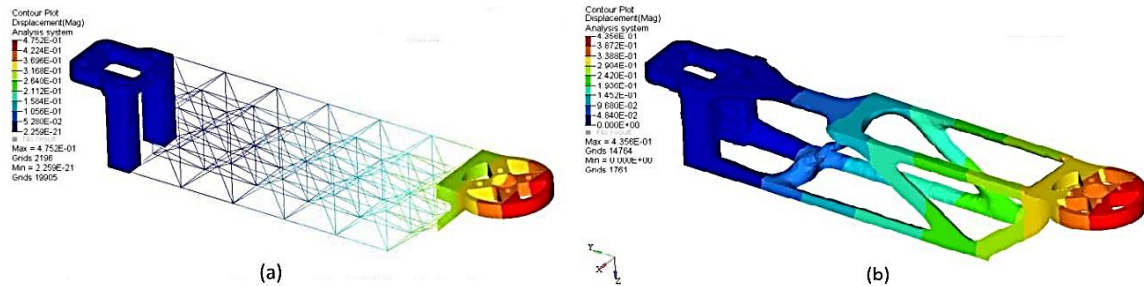
modelin maksimum gerilme değerinin 0,215 MPa olduğu, içi boş olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,484 MPa olduğu, içi kafes dolgu olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,509 MPa olduğu ve içi ızgara dolgu olan tasarımın maksimum gerilme değerinin 0,479 MPa olduğu belirtilmiştir. Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan kirişler tasarlanmış ve kirişlerin her biri kafes yapılar ile doldurularak sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet tatbik edilerek üç nokta bükme testi uygulanmış ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen dayanım grafiği Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. Esneleme dayanımı-kafes kalınlığı grafiği [35]  
(Deflection strength-lattice thickness graph)

3.2.3. Birim hücre içeren topoloji çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkisi (The effect of topology studies including unit cells on the amount of displacement in the structure)

Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar döner kanatlı insansız hava araçlarının yapı kütlelerindeki değişimin maksimum yer değiştirme miktarına etkisini incelemişlerdir. Tang vd. [27] tarafından yapılan çalışmada kafes yapılar için istenilen baskı kalitesinin üretilebilirliğini dikkate alan bir tasarım ve optimizasyon stratejisi önerilerek heterojen yapıya sahip kafeslerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca geleneksel topoloji optimizasyonu yöntemiyle (SIMP) elde edilen bir kıyaslama numunesi de üretilmiştir. Herhangi bir optimizasyon işlemi uygulanmayan numunelerin yer değiştirme değerlerinin ortalama 4,834 mm olduğu, homojen kafes yapıya sahip numunelerin maksimum yer değiştirme değerlerinin ortalama 0,875 mm olduğu ve SIMP yöntemiyle üretilen numunelerin yer değiştirme değerlerinin ise ortalama 0,354 mm olduğu belirtilmiştir. Analiz edilen modeller Şekil 23’te gösterilmiştir.

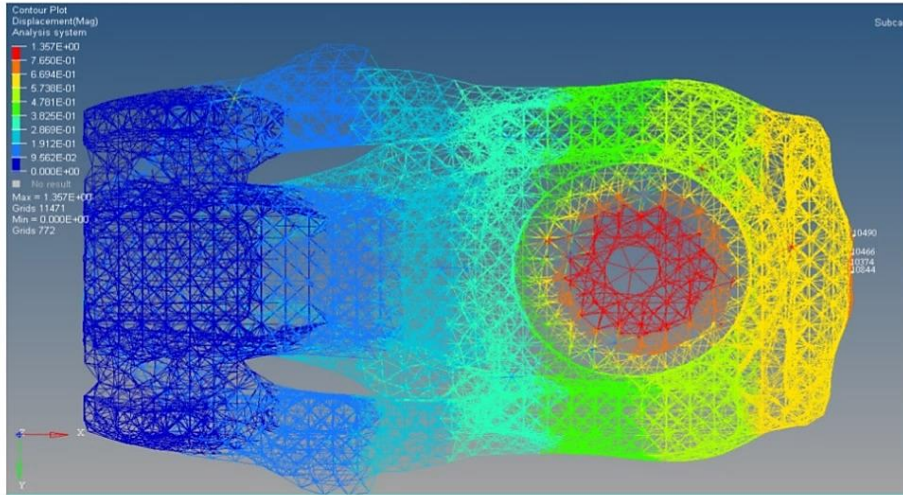


Şekil 23. Analiz edilen modeller a) Heterojen kafes yapısı b) SIMP yöntemi ile tasarlanmış yapı [27]  
(Analyzed models a) Heterogeneous lattice structure b) Structure designed with the SIMP method)

Sripada [28] tarafından yapılan çalışma ile sağlam ve hafif yapıya sahip drone motor montaj parçası tasarlanması hedeflenmiştir. Motor bağlantı bölgesi ve drone kolu bağlantı bölgesi için ölçü sınırlamaları içeren bir blok model, CAD programı kullanılarak tasarlanmış ve OptiStruct programına

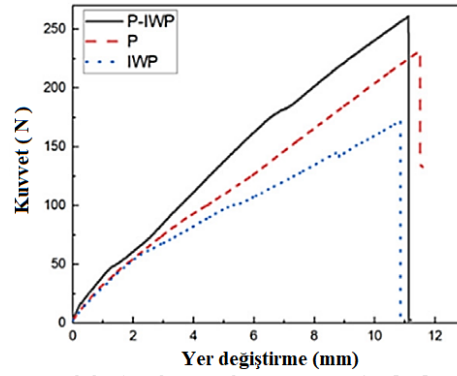


aktarılmıştır. Modelin 0,77 mm yer değiştirme miktarına sahip olduğu belirtilmiştir. Blok model üzerinde bulunan montaj bölgeleri seçilerek sabit tutulan bölge olarak belirlenmiş ve optimizasyon uygulanmıştır. Element Pro yazılımı kullanılarak modelin içyapısı düzenlenmiş ve kafeslerden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm olacak şekilde üç farklı durum için kafes optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve modelin tamamen kafes yapıya sahip olması sağlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme değeri 0,675 mm, kafes kirişlerinin kalınlığı 1,5 mm olan modelin yer değiştirme değeri 0,35 mm ve kafes kirişlerinin kalınlığı 2 mm olan modelin yer değiştirme değeri ise 0,2 mm ölçüldüğü belirtilmiştir. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme diyagramı Şekil 24'te gösterilmiştir.



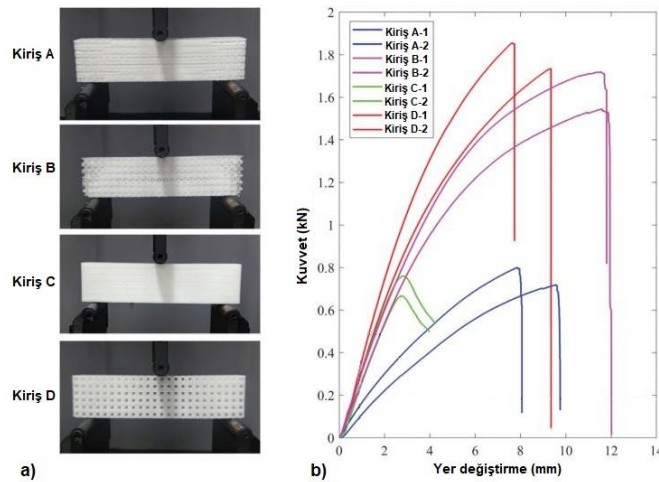
Şekil 24. Kafes kirişlerinin kalınlığı 1 mm olan modelin yer değiştirme diyagramı [28]  
(Displacement diagram of the model with 1 mm thickness of the truss)

Laporte [30] tarafından yapılan çalışmada fırçasız motorun hava aracı gövdesine sabitlenmesini sağlayan tutucunun kütesini azaltırken, mekanik kuvvetlere ve motorun neden olduğu titreşimlere karşı direnç gösterme yeteneğini korumak hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan birim hücre yapısının organik ilhamlı (ORG) kafes olduğu ve içinin boş olduğu belirtilmiştir. ORG kafeslerinden oluşan farklı türde birim hücreler Catia yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve Fusion 360 Autodesk yazılımı kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Her biri 2,5x2,5x2,5 mm boyutlarında 202 birim hücreden oluşan yapı "Lattice 202" olarak adlandırılmış ve her biri 5x5x5 mm boyutlarında 28 birim hücreden oluşan yapı "Kafes 28" olarak adlandırılmıştır. Tutucu tasarımı üzerine toplamda 11,67 N değerinde bir itme kuvveti uygulanarak sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Başlangıç tasarımının yer değiştirme değerinin 1,23e-4 mm olduğu, "Lattice 202" kafeslerden oluşan yapının yer değiştirme değerinin 9,717e-3 mm olduğu ve "Lattice 28" kafeslerden oluşan yapının yer değiştirme değerinin 2,619e-3 mm olduğu belirtilmiştir. Ren vd. [32] tarafından yapılan çalışmada heterojen yapıların performansını ve işlevini daha da geliştirmek için geometrik sürekliliğe sahip çok ölçekli ve çoklu TPMS kafeslerin optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Kafes yapılar, üçlü periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) türetilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulama yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde Sınıf-P-IWP numunenin maksimum yer değiştirmesi 11,1 mm, Sınıf-P numunenin maksimum yer değiştirmesi 11,5 mm ve Sınıf-IWP numunenin maksimum yer değiştirmesi 10,8 mm olarak belirtilmiştir. Numunelere uygulanan yük sonucunda elde edilen grafik Şekil 25'te gösterilmiştir.



Şekil 25. Yük - yer değiştirme grafiği [32]  
(Load - displacement graph)

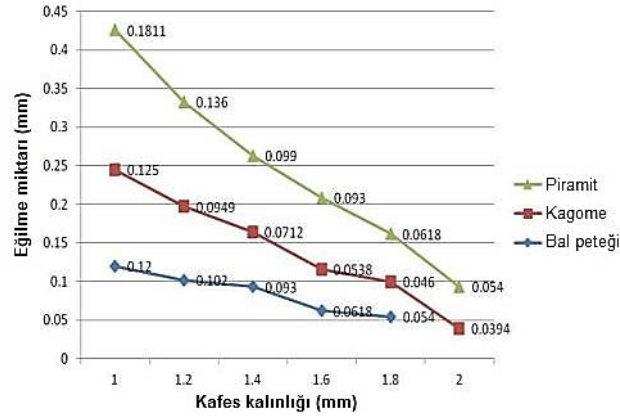
Li vd. [36] tarafından yapılan çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş hücreli yapıların istenen mekanik özelliklere uygun tasarlanması için yeni bir optimizasyon stratejisi geliştirilmiştir. Sonlu eleman analizi ile inceleme yapmak için sade gyroid kafes, standart topoloji optimizasyonu, geliştirilen yaklaşım (Şekil korumalı FGCS) ve yön korumalı FGCS olmak üzere dört farklı optimizasyon stratejisi değerlendirmeye alınmıştır. Katı modeller ile yapılan deneylerin sonucunda sade gyroid kafes yapısı ile üretilen modelin 1,843 mm yer değiştirme değerine sahip olduğu, FGCS optimizasyonu ile üretilen modelin ise 1,020 mm yer değiştirme değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Zhang vd. [34] tarafından yapılan çalışmada, yeni bir kafes yapı oluşturulmuş ve geliştirilen yöntemin performansı, mevcut kafes yapı optimizasyonu yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada, x-y düzlemindeki kafes özelliklerine odaklanıldığı belirtilmiş ve farklı hacim kesri kısıtlamalarına uygun olmak üzere üç kafes grubu, sırasıyla x ekseninde maksimum çekme modülüne, y ekseninde maksimum çekme modülüne ve x-y düzlemi içinde maksimum kesme modülüne sahip olacak şekilde topoloji optimizasyonu yoluyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kafes grupları farklı kombinasyonlar halinde birbirleriyle birleştirilerek çeşitli kafes yapı biçimleri elde edilmiştir. Çalışmada öngörülen destek ve yükleme koşulu altında yapısal deformasyonu en aza indiren malzeme yoğunluk dağılımını bulmayı amaçlayan minimum uyumluluk problemi araştırılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak amacıyla kiriş modeli üzerinde üç noktalı bükme deneyleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kütle hafifletme oranı %40 olarak belirlenerek optimize edilmiş olan kiriş modellerinin üretiminde sıvı reçineyi katı yapıya dönüştüren eklemeli imalat yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Bükme testlerinde kullanılacak olan her bir kiriş modelinden 120x30x20 ebatlarında ikişer adet üretildiği ve bükme deneylerinin universal bir test cihazında 2 mm/s ilerleme hızıyla gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Bükme deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Bükme deneyi ve sonuçları a) bükme deneyleri b) kuvvet - yer değiştirme grafiği [34]  
(Force - displacement graph)

Patel vd. [35] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli kafes yapılarını analiz etmek ve insansız hava araçları için en uygun dayanım özelliklerine sahip yapıyı tespit etmek amaçlanmıştır. Çalışmada bal peteği yapısı, kagome yapısı ve piramit yapısı olmak üzere üç çeşit kafes yapısı incelenmiştir. Ölçüleri 20 x 20 x 100 mm olan kirişler tasarlanmış ve kirişlerin her biri kafes yapılar ile doldurularak

sandviç panel haline getirilmiştir. Birim hücrelerin duvar kalınlığı değerlerinin 1 mm ile 2 mm arasında olacak şekilde tasarlandığı belirtilmiştir. Bal peteği şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 5 çeşit, kagome şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit ve piramit şeklindeki birim hücrelerin kullanıldığı panellerin 6 çeşit tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan panellerin eklemeli imalat yöntemiyle üretimi, Akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzeme kullanılarak FDM yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Yapıların dayanım özelliklerini incelemek için Solidworks yazılımında panellere 15 N kuvvet tatbik edilerek üç nokta bükme testi uygulanmış ve statik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme grafiği Şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. Eğilme-kafes kalınlığı grafiği [35]  
(Deflection-lattice thickness graph)

Zhou vd. [37] tarafından yapılan çalışmada, özelleştirilebilir mekanik özellikler elde etmek için kafes yapıların mimari özellikleri değiştirilen çoklu morfolojiye sahip kompozit kafes yapılar incelenmiştir. I-Wrap Packet (IWP) kafes yapısı ile ilkel kafes (P) yapısı birleştirilerek kompozit bir yapı (IWP-P) elde edilmiştir. IWP, IWP-P izotropik ve IWP-P anizotropik olmak üzere üç farklı optimizasyon tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri sonucunda; IWP kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,96 mm, IWP-P izotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,73 mm ve IWP-P anizotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarı 0,65 mm olarak belirtilmiştir. IWP-P izotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarında %23,96 ve IWP-P anizotropik kafes ile tasarlanan modelin maksimum yer değiştirme miktarında %32,29 azalma olduğu belirtilmiştir.

#### 4. Tartışma ve Bulgular (Discussion and Findings)

Literatürde bulunan ve döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendikten sonra elde edilen bulgular başlıklar halinde tartışılmıştır.

Birim hücre içermeyen topoloji çalışmaları incelendiğinde literatürdeki çalışmalar ile genellikle yapı ağırlığının, yapıdaki iç gerilmelerin ve kuvvete maruz kalan yapıdaki maksimum yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. Bazı çalışmalarda [12,29] modal analiz yapılarak frekans değerlerinin de araştırıldığı, bazı çalışmalarda [12,20] ise yorulma dayanımı değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. Birim hücre içeren topoloji çalışmaları incelendiğinde literatürdeki çalışmalar ile genellikle yapı ağırlığının, yapıdaki iç gerilmelerin ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalarda genel olarak döner kanatlı insansız hava araçlarında kol tasarımının optimize edildiği görülmüştür. Fakat bir çalışmada [28] kol bağlantı parçasının optimize edildiği, başka bir çalışmada [30] ise motor bağlantı parçasının optimize edildiği görülmüştür. Birim hücre içeren optimizasyon çalışmalarında, başlangıç tasarımının gelişimini incelemekten ziyade TPMS, gyroid, hexahedron vb. gibi farklı birim hücre yapılarının dayanım özelliklerinin araştırıldığı görülmüştür. Fakat bazı çalışmalarda [26,27,29,33] başlangıç tasarımına ait verilerin de yer aldığı görülmüştür.

##### 4.1. Yapı ağırlığındaki değişim için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings for the change in structure weight)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında yapı ağırlığını azaltmayı hedefleyen topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde birim hücre içermeyen çalışmalarda genellikle kütle azaltma oranının %20

ile %60 arasında olduğu görülmüş iken birim hücre içeren çalışmalarda bu oranın %57 [33] ile %60 [30] arasında olduğu görülmüştür. Birim hücre içermeyen bazı çalışmalarda [12] hafifletme oranının %60 değerinden fazla olduğu, bazı çalışmalarda [12,18] ise %20 değerinden az olduğu görülmüştür. Fakat birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu çalışmalarında başlangıç tasarımının ağırlığına ilişkin verilerin bazı çalışmalarda bulunmaması nedeniyle birim hücre yapısı kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon işleminin başlangıç tasarımındaki ağırlığa etkisinin incelenmediği görülmüştür. Yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde araştırmacıların uyguladıkları optimizasyon işlemleri sayesinde hava araçlarının kütlelerinde azalma meydana gelmesine rağmen yapısal dayanımın korunduğu görülmüştür.

#### 4.2. Yapı gerilimindeki değişim için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings obtained for the change in structure stress)

Döner kanatlı insansız hava araçlarında uygulanan topoloji optimizasyonu çalışmaları incelendiğinde topoloji optimizasyonu işlemi öncesindeki modelin gerilme değerlerinin optimizasyon sonrasındaki modelin gerilme değerlerinden genel olarak daha düşük olduğu belirtilmiştir. Araştırmacıların bu sonucunu destekleyen ve birim hücre içermeyen bir çalışmada [13] verilen gerilme-kuvvet grafiği incelendiğinde, optimizasyon işlemi nedeniyle yapı geriliminin arttığı ve optimize edilen yapıdaki gerilim-kuvvet eğrisinin eğiminde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fakat birim hücre içermeyen iki çalışmada [18,26] ve birim hücre içeren bir çalışmada [27] optimizasyon işlemi nedeniyle model üzerinde oluşan gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Birim hücre içeren bir çalışmada [35] verilen esneme dayanımı grafiği incelendiğinde, birim hücre kalınlığındaki artışın tüm numunelerde dayanım artışı sağladığı görülmüştür. Bir çalışmada [16] verilen gerilme-gerinim grafiği incelendiğinde, dolgu deseni açısının değişimine bağlı olarak yapıdaki gerilme miktarının değiştiği görülmüştür.

Birim hücre içermeyen optimizasyon işlemi sonrasında meydana gelen gerilim değişimi değerlerinin genellikle 1,5 kat [13] ile 8 kat [18] arasında olduğu görülürken birim hücre içeren optimizasyon işlemleri sonrasında meydana gelen gerilim değişimi değerlerinin 2 kat [33] ile 114 kat [30] arasında olduğu görülmüştür. Birim hücre içeren optimizasyon çalışmalarında gerilim değerlerinin nispeten yüksek olmasına, optimizasyon işleminin algoritmalarından bağımsız bir şekilde tasarımcı tarafından seçilen birim hücre yapısına dayalı olmasının sebep olduğu düşünülmüştür. Bazı araştırmacılar [20] gerilim değerlerindeki artış miktarının makul olduğunu ve modelin güvenli bir şekilde işlevini yerine getirebileceğini belirtmiştir.

#### 4.3. Yapıdaki maksimum yer değişimi için elde edilen bulguların tartışılması (Discussion of the findings for the maximum displacement in the structure)

Döner kanatlı insansız hava araçları için gerçekleştirilmiş olan topoloji optimizasyonu çalışmalarının yapıdaki yer değiştirme miktarına etkileri incelendiğinde, birim hücre içermeyen bir çalışmada [13] verilen yer değiştirme-kuvvet grafiğinde yapıdaki yer değiştirme miktarının arttığı ve optimize edilen yapıdaki yer değiştirme-kuvvet eğrisinin eğiminde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Birim hücre içermeyen çalışmalar arasında en küçük yer değişimi değerinin 2 kat [13] olduğu ve en büyük yer değişimi değerinin ise 13 kat [27] olduğu görülmüştür. Birim hücre içeren çalışmalar arasında ise en küçük yer değişimi değerinin 1,1 kat [28] olduğu ve en büyük yer değişimi değerinin 79 kat [30] olduğu görülmüştür. Yer değiştirme miktarındaki değişimin 79 kat olduğu çalışmada [30] test edilen başka bir kafes yapısının yer değiştirme miktarındaki değişimin 21 kat olduğu görülmüştür. Bu değerler yorumlandığında birim hücre içeren optimizasyon çalışmasında [30] yer değiştirme değerinin nispeten yüksek olmasına, optimizasyon işleminin algoritmalarından bağımsız bir şekilde tasarımcı tarafından seçilen birim hücre yapısına dayalı olmasının sebep olduğu düşünülmüştür.

Topoloji optimizasyonu işlemi uygulanan tasarımların yer değiştirme değerlerinde genel olarak artış meydana geldiği fakat birim hücre içermeyen bir çalışmada [27] ve birim hücre içeren üç çalışmada [26,27,35] yer değiştirme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Birim hücre içeren bir çalışmada [35] verilen eğilme miktarı-kafes kalınlığı grafiği incelendiğinde, kafes kalınlığındaki artış ile birlikte yer değiştirme miktarının azaldığı görülmüştür.

Birim hücre kullanılarak gerçekleştirilen bazı optimizasyon çalışmalarında [26,27,32] TPMS, gyroid hexahedron vb. gibi çeşitli birim hücrelerin yapıdaki yer değiştirme miktarına etkileri incelenmiş ve temel kafes yapılar ile kıyaslandığında modifiye edilmiş kafes yapıların daha küçük yer değiştirme

değerlerine sahip oldukları belirtilmiştir. Araştırmacıların elde ettikleri bu sonucu destekleyen bir çalışmada [32] verilen kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde yalın IWP hücrelerden oluşan yapının 171,4 N kuvvete karşılık 10,8 mm yer değiştirdiği, yalın P hücrelerden oluşan yapının 231,4 N kuvvete karşılık 11,5 mm yer değiştirdiği ve P-IWP kompozit hücrelerden oluşan yapının 260,8 N kuvvete karşılık 11,1 mm yer değiştirdiği gözlemlenmiştir. Grafik verilerine göre melez hücrelerden oluşan yapının yalın hücrelerden oluşan yapılarla karşılaştırıldığında daha küçük yer değiştirme davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışmada [34] verilen kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde tek tip hücrelerden oluşan "Kiriş A" isimli yapının yaklaşık 800 N kuvvete karşılık 8 mm yer değiştirdiği, karma hücrelerden oluşan "Kiriş D" isimli yapının yaklaşık 1800 N kuvvete karşılık 8 mm yer değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Birim hücre içeren iki çalışmada [26,32] birim hücrelerin kullanıldığı optimizasyon işlemi ile birim hücrelerin kullanılmadığı optimizasyon işlemi karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda verilen yer değiştirme diyagramları incelendiğinde, birim hücrelerin kullanıldığı yapıdaki yer değiştirme miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

## 5. Sonuçlar (Results)

Hava araçlarında hafiflik ve dayanıklılık konuları büyük önem arz etmektedir. Hava aracı çeşitlerinden biri olan döner kanatlı hava araçlarında topoloji optimizasyonu, hafif ve dayanıklı yapıların tasarlanması ve üretilmesi sürecinde kullanılan bir yöntemdir. Topoloji optimizasyonu yöntemlerini kullanarak yüksek dayanım-ağırlık oranlarına sahip tasarımlar elde etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada topoloji optimizasyonu yöntemlerinin döner kanatlı hava aracı tasarımına etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Hava aracı tasarımında hafif ve dayanıklı yapılar geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda araştırmacılar tarafından birim hücre yapısı içeren optimizasyon teknikleri ve birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon teknikleri olmak üzere iki farklı strateji kullanıldığı görülmüştür.
- Birim hücre yapısı içermeyen topoloji optimizasyonu çalışmalarında en çok tercih edilen yöntemin SIMP yöntemi olduğu gözlemlenmiştir.
- Birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle hava araçlarının gövde merkezi ve kol kirişi parçalarının optimize edildiği, birim hücre içeren topoloji optimizasyonu teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda ise genellikle kol kirişi parçalarının optimize edildiği gözlemlenmiştir.
- İncelenen optimizasyon çalışmalarında, birim hücre içermeyen çalışmalar ile başlangıç tasarımındaki yapısal gelişimin araştırıldığı görülmüş fakat birim hücre içeren çalışmaların sadece bazılarında başlangıç tasarımındaki yapısal gelişimin araştırıldığı görülmüştür.
- Birim hücre içeren topoloji optimizasyonu yönteminde kullanılan birim hücrelerin çok çeşitli olmaları ve her bir birim hücre tipinin kendine özgü mekanik özellikleri bulunması nedeniyle bu yapıların üstün ve zayıf yönlerini, birim hücre içermeyen topoloji optimizasyonu yöntemleriyle kıyaslayan az sayıda çalışma olduğu görülmüştür.
- Topoloji optimizasyonu yöntemlerinin hava aracı tasarımında yapı ağırlığını, yapı gerilimini ve kuvvete maruz kalan yapıdaki yer değiştirme değerini etkilediği tespit edilmiştir. Birim hücre yapısı içermeyen optimizasyon yöntemlerine ait etkilerin, birim hücre yapısı içeren optimizasyon yöntemlerinin etkilerine göre parametrik bakımdan daha kontrol edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.
- Topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor geometrilere sahip olabildiği ve bu nedenle modellerin üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin tercih edildiği gözlemlenmiştir. İncelenen çalışmalarda topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tasarımların eklemeli imalat teknikleriyle üretimi için genellikle FDM yönteminin kullanıldığı görülmüştür.



## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] O. Villi and M. Yakar, "İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri," *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, vol 4, no 2, pp 73-100, Kasım 2022. doi:10.51534/tiha.1189263
- [2] T. Şeker, "Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [3] J. D. Deaton and R. V. Grandhi, "A Survey of Structural and Multidisciplinary Continuum Topology Optimization: Post 2000," *Struct Multidisc Optim*, vol. 49, pp. 1–38, July 2014. doi:10.1007/s00158-013-0956-z
- [4] D. Ö. Helvacı, "Tiling of Cellular Structures Into the Parts According Tothe Density Values of SIMP Topology Optimization," MSc dissertation, Middle East Technical Univ, Ankara, Turkey, 2020.
- [5] M. F. Polat, "Generative Topology Optimization for Additive Manufacturing," Yüksek lisans tezi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2021.
- [6] V. Kılıç, "Alüminyum Kafes Sistemlerin Meta Sezgisel Optimizasyon Tekniklerine Göre Optimum Tasarımı," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye, 2018.
- [7] X. Huang and Y. M. Xie, "A further Review of ESO Type Methods for Topology Optimization," *Struct Multidisc Optim*, vol. 41, pp. 671–683, January 2010. doi:10.1007/s00158-010-0487-9
- [8] F. M. Özkal and H. Uysal, "General Aspects of Evolutionary Structural Optimization: A Review," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 15, sayı 3, sayfa 383-393, July 2009.
- [9] Q. M. Querin, G. P. Steven and Y. M. Xie, "Evolutionary Structural Optimisation (ESO) Using a Bidirectional Algorithm," *Evolutionary Structural Optimisation*, vol. 15, no. 8, pp. 1031-1048, April 1998.
- [10] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar and J. Y. Jeng, "A State-of-the-art Review on Types, Design, Optimization, and Additive Manufacturing of Cellular Structures," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, pp. 3489-3510, June 2019. doi:10.1007/s00170-019-04085-3
- [11] Y. Sağlam, H. Gökçe, N. Top and İ. Şahin, "Design of an Artificial Femur Scaffold for Bone Tissue Engineering," *Alpha Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol 1, no 1, pp 1–9, 2023. doi:10.1557/s43578-021-00156-y
- [12] H. Guo, M. Li, P. Sun, C. Zhao, W. Zuo and X. Li, "Lightweight and Maintainable Rotary-Wing UAV Frame from Configurable Design to Detailed Design," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 7, July 2021. doi:10.1177/168781402111034999
- [13] E. M. Rayed, B. Esakki, A. Ponnambalam, S. C. Banik and K. Aly, "Optimization of UAV Structure and Evaluation of Vibrational and Fatigue Characteristics Through Simulation Studies," *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, vol. 12, no. 17, August 2021. doi:10.1051/smdo/2021020
- [14] Y. L. Yap, W. Toh, A. Giam, F. R. Yong, K. I. Chan, J. W. Tay, S. S. Teong, R. Lin and T. Y. Ng, "Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing," *International Journal of Mechanical Sciences*, 237, September 2023. doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107771
- [15] F. Gafurzade, "İnsansız Hava Araçlarına Ait Termoplastik Kompozit Yapısal Parçaların Topoloji Optimizasyonu Yöntemi ile Tasarımı ve Eklemeli İmalat Metodu ile Üretim Şartlarının İncelenmesi," Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2022.
- [16] H. Klippstein, H. Hassanin. A. D. Sanches, Y. Zweiri. and L. Seneviratne, "Additive Manufacturing of Porous Structures for Unmanned Aerial Vehicles Applications," *Advanced Engineering Materials*, vol. 20, no. 9, May 2018. doi:10.1002/adem201800290
- [17] G. L. Goh, V. Dikshit, R. Koneru, Z. K. Peh, W. Lu, G. D. Goh and W. Y. Yeong, "Fabrication of Design-optimized Multifunctional Safety Cage with Conformal Circuits for Drone Using Hybrid 3D Printing Technology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no 120, pp. 2573-2586, January 2022. doi:10.1007/s00170-022-08831-y
- [18] B. S. Yıldız, "Yeni Bir Hibrit Metasezgisel Algoritma ile Drone Kolunun Yapısal Optimizasyonu." *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol 21, no 2, pp 74-80, Ağustos 2023. doi: 10.56193/matim.1302774
- [19] B. Esakki, S. Mathiyazhagan, M. Moses, K. J. Rao and G. Ganesan. "Development of 3D-Printed Floating Quadrotor for Collection of Algae in Remote Water Bodies," *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, July 2019. doi:10.1016/j.compag.2019.104891
- [20] A. Yakin, T. Simsek. and A. Akkurt, "Remodeling of the Drone Chassis Designed for Additive Manufacturing Method According to Topology Optimization," in *5 th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, All Science Proceedings*,



2023, Konya, Turkey, July 10-12, 2023.

- [21] S. Nvss, B. Esakki, L. J. Yang, C. Udayagiri. and K. S. Vepa, "Design and Development of Unibody Quadcopter Structure Using Optimization and Additive Manufacturing Techniques," *Design*, vol. 6, no. 8, January 2022. doi:10.3390/designs6010008
- [22] J. L. Prado, "Economic Optimization of Drone Structure for Industrial Indoor Use by Additive Manufacturing," MSc dissertation, Politecnico di Torino, Torino, Italy, December 2022.
- [23] S. A. Khan, Z. Mehmood. and Z. Afshan, "Design, Analysis and Topology Optimization of a Landing Gear Strut for a Quadcopter Upon Impact," *International Conference on Applied and Engineering Mathematics, ICAEM*, 2021, London, United Kingdom, July 2021.
- [24] G. Xiang, Y. Zhu, X. Cheng. and C. Liu, "Lightweight Design and Analysis of Four-Wing UAV Fuselage Structure Based on Topology Optimization," *In Proceedings of the 2nd International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology*, 110-116, 2023.
- [25] E. Natarajan, C. T. Ang, W. H. Lim, G. Kosalishkwaran, C. Ang. and S. Parasuraman, "Design Topology Optimization and Kinematics of a Multi-modal Quadcopter and Quadrupe," *Student Conference on Research and Development, SCORED*, 2019, Perak, Malaysia, October 15-17, 2019.
- [26] K. M. Ali, M. A. Tawafik. and A. A. Laber, "Quadcopter Topology Optimization Based on Impact Analysis," *4th International Scientific Conference of Alkafeel University, ISCKU*, 2022, AIP Conference Proceedings, December 22, 2023.
- [27] Y. Tang, G. Dong, Q. Zhou, and Y. F. Zhao, "Lattice Structure Design and Optimization With Additive Manufacturing Constraints," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 1546-1562, October 2018, doi:10.1109/TASE.2018.2875650
- [28] N. S. Sripada, "A Methodology for Topology and Lattice Structure Optimization of a Cargo Drone Motor Mount," MSc. dissertation, The University of Texas at Arlington, Texas, USA, 2017.
- [29] G. Palomba, V. Crupi. and G. Epasto, "Additively Manufactured Lightweight Monitoring Drones: Design and Experimental Investigation," *Polymer*, 242, January 2022, doi:10.1016/j.polimer.2022.124557
- [30] T. Laporte, "Design, Simulation and Optimisation of Lattice Structures for Remote Control Aeroplane," *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, vol. 3, no. 1, pp. 106-114, February 2021, doi:10.1108/JIMSE-12-2020-0028
- [31] Z. Wang. and A. Y. Tamijani, "Computational Synthesis of Large-scale Three-dimensional Heterogeneous Lattice Structures," *Aerospace Science and Technology*, 120, November 2022, doi:10.1016/j.ast.2021.107258
- [32] F. Ren, C. Zhang, W. Liao, T. Liu, D. Li, X. Shi, W. Jiang, C. Wang, J. Qi, Y. Chen and Z. Wang, "Transition Boundaries And Stiffness Optimal Design For Multi-TPMS Lattices," *Materials & Design*, 210, August 2021. doi:10.1016/j.matdes.2021.110062
- [33] T. L. Oliveira and J. Carvalho, "Design And Numerical Evaluation Of Quadrotor Drone Frame Suitable For Fabrication Using Fused Filament Fabrication With Consumer Grade ABS," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 436, August 2021. doi:10.1007/s40430-021-03160-9
- [34] C. Zhang, J. Liu, Z. Yuan, S. Xu, B. Zou, L. Li, and Y. Ma "A Novel Lattice Structure Topology Optimization Method with Extreme Anisotropic Lattice Properties," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1367-1390, 2021, doi:10.1093/jcde/qwab051
- [35] S. Patel, A. Bhoi, V. Maurya, A. Wanghede and R. Bakshi, "Design and Test 3D Printed Lattice Structure for UAV," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 5, pp. 7169-7174, May 2020.
- [36] D. Li, W. Liao, N. Dai, G. Dong, Y. Tang, and Y. M. Xie, "Optimal Design and Modeling of Gyroid-based Functionally Graded Cellular Structures for Additive Manufacturing," *Computer-Aided Design*, vol. 104, pp. 87-99, June 2018. doi:10.1016/j.cad.2018.06003
- [37] H. Zhou, D. Z. Zhang, N. He. and M. Zhao, "Topology Optimization of Multi-morphology Composite Lattice Structure with Anisotropy Properties," *Composite Structures*, 321, June 2023. doi:10.1016/j.compstruct.2023117294

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



## Selection Place for the High-Speed Train Network Structuring in Türkiye

Hulusi Aydemir<sup>a</sup>, Burçin Paçacı<sup>b</sup>, M. Kürşat Çubuk<sup>c</sup>

Submitted: 15.12.2023 Revised: 06.09.2024 Accepted: 14.10.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR05

### ABSTRACT

**Keywords:** Transportation planning, HST, railway, QGIS, AHP

<sup>a\*</sup> General Directorate of Turkish State Railways, Railway Modernization Department Directorate, Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-7989-4136

<sup>b</sup> Gazi University, Engineering Faculty, Dept. of Civil Engineering 06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-6053-0458

<sup>c</sup> Gazi University, Engineering Faculty, Dept. of Civil Engineering 06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-8155-7123

\*Corresponding author:  
hulusiaydemir1@gmail.com

High-speed trains (HST), which are environmentally friendly, economical and time-saving, have recently been among the important transportation projects in Türkiye. In this study, the optimal provincial selection has been made for a HST which is planned to be carried out in Türkiye. In this direction, five criteria were determined as ‘Population’, ‘Tourism’, ‘Number of students’, ‘Socio-economic development’ and ‘Distance’ by investigating relevant literature and taking the opinions of experts in the field. Alternatives which have a railway freight station and a railway network, but there are no existing high-speed train projects, have been determined taking into account the parameters of ‘Tourism’, ‘Population’ and ‘Number of students’ by experts. In the rankings obtained using the AHP method in accordance with the data obtained from the relevant institutions and the opinions of experts in the field, the first among the criteria was found to be the ‘Tourism’ criterion, and the top five most suitable provinces for construction were found respectively Aydın, Hatay, Şanlıurfa, Tekirdağ and Kütahya. According to the results of this study, it is beneficial for Aydın province, where tourism activities are active, to establish a connection with the high-speed train network, which is under construction in the surrounding provinces.

## Türkiye’de Yüksek Hızlı Tren Ağı Yapılanması için Yer Seçimi

### ÖZ

Çevre dostu, ekonomik ve zaman kazandıran yüksek hızlı trenler (YHT) son dönemde Türkiye'nin önemli ulaşım projeleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, Türkiye’de yapılması planlanan bir YHT için en uygun il seçimi yapılmıştır. Bu doğrultuda ilgili literatür araştırılarak ve alanında uzman görüşleri alınarak ‘Nüfus’, ‘Turizm’, ‘Öğrenci sayısı’, ‘Sosyo-ekonomik kalkınma’ ve ‘Mesafe’ olarak beş kriter belirlenmiştir. Demiryolu yük istasyonu ve demiryolu ağına sahip ancak mevcut hızlı tren projesi bulunmayan alternatifler, uzmanlar tarafından ‘Turizm’, ‘Nüfus’ ve ‘Öğrenci sayısı’ parametreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. İlgili kurumlardan elde edilen veriler ve alanında uzman kişilerin görüşleri doğrultusunda AHP yöntemi kullanılarak elde edilen sıralamalarda kriterler arasında ilk sırada ‘Turizm’ kriteri, yapıma en uygun ilk beş il sırasıyla ‘Aydın’, ‘Hatay’, ‘Şanlıurfa’, ‘Tekirdağ’ ve ‘Kütahya’ bulunmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarına göre turizm faaliyetlerinin aktif olduğu Aydın ilinin çevre illerde yapımı devam eden hızlı tren ağı ile bağlantı kurması faydalı olmaktadır.

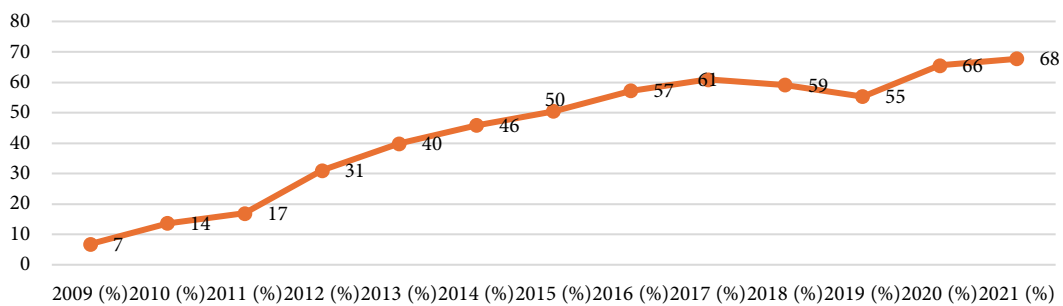
**Anahtar Kelimeler:** Ulaşım planlaması, YHT, Demir yolu, QGIS, AHP

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda ulaşım sistemleri arasında eğilimin söz konusu olduğu yüksek hızlı tren (YHT) ile taşımacılık, karayolu ve hava taşımacılığı ile rekabet etmektedir. Bu ulaşım türünün yüksek hız, konfor ve güvenlik gibi avantajlara sahip olması, YHT'nin birçok ülkede baskın hale gelmesini sağlamıştır [1]. Genellikle orta mesafeli yolculuklar için en iyi ulaşım aracı [2] olarak kabul edilen YHT'ler 19. yüzyılın başında geliştirilen demiryolu taşımacılığı prensibine dayanmakta olup günümüzde teknolojik gelişmelerle saatte 500 km'den fazla mesafe katetebilen hıza ulaşmış durumdadır [3].

YHT'lerin ulaşım sistemleri arasında birçok güçlü yönleri bulunmaktadır. Güvenli ve konforlu bir ulaşım türü olan YHT'ler sayesinde daha az karbon emisyon değeri ile çevre dostu ulaşım gerçekleştirilmektedir [4]. Ulaşımında sera gazını azaltmak amacıyla çok sayıda politika yürütüldüğünden dolayı [5] 2018 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) Kapsamında hazırlanan Türkiye'nin Yedinci Ulusal Bildirimi raporunda Türkiye'nin sera gazı emisyonu azaltım politikalarında hızlı tren politikalarının gerçekleştirilmesi yer almaktadır [6]. YHT'ler aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlamaktadır [7]. Demir yolu, kara yolu ve hava yolu ulaşım sistemlerinin enerji tüketiminde büyük farklar söz konusudur. Kara yolu (otomobil), hava yolu (uçak) ve demir yolu (yüksek hızlı tren) taşımacılıklarında bir kilometrede taşınan 100 yolcu için tüketilen enerjinin sırasıyla 6.00, 7.70 ve 2.50 olduğu bilinmektedir. Buna göre otomobil ile yolcu taşımacılığı yüksek hızlı tren ile yolcu taşımacılığının iki katından fazla, uçak ile yolcu taşımacılığı ise yüksek hızlı tren ile yolcu taşımacılığının yaklaşık üç katı kadardır [8]. YHT'ler zamandan tasarruf sağladığı [9] gibi aynı zamanda yolculara düşük maliyetli hizmet sunmaktadır [10]. YHT'ye talebin artmasında YHT'lerin trafik sorunu olmaması [11], dakik olması [7], çalışmasında yenilenebilir enerji kullanılması, birim enerji miktarına göre yüksek taşıma kapasitesinin olması [12], gelişen teknoloji sayesinde daha az gürültü ile çevreyle uyumlu olması [13], hava koşullarından etkilenmemesi ve ulaşımında sürekliliğin sağlanması gibi etkenler önemli yer kaplamaktadır [7]. Bunlara ilaveten YHT, şehirlerin bölgenin cazibe merkezleri haline dönüştürülmesini de etkileyebilmektedir. Şehir alanlarına kurulan YHT istasyonları sayesinde şehirlerin erişilebilirliğine ve gelişimine katkı sağlanmaktadır [4,14]. Ayrıca yüksek hızlı tren ile bağlantı kurulan şehirler arası iletişim de artmakta [14] olup bölgelerin kalkınmasının desteklenmesinde YHT'ler önem teşkil etmektedir [7].

Türkiye'de 2000'li yılların başından bu yana kara yolu taşımacılığının demir yolu taşımacılığına aktarılmasına yönelik politikalar yürütülmektedir [10]. Bu kapsamda YHT, Türkiye'de ilk kez 2009 yılında Ankara-Eskişehir arasında faaliyete geçmiş ve gündün güne YHT kullanımında artış meydana gelmiştir. 2009-2021 yılları arasında YHT'yi kullanan yolcuların yüzdesel değişimi Şekil 1.'de yer almaktadır [15].



Şekil 1. Yıllara göre yolcuların yüzdesel değişimi [15]  
(Percentage change of passengers in Türkiye)

Şekil 1 incelendiğinde Türkiye'de YHT'nin yolcu talebinde önemli artışlar olduğu görülmektedir. Fakat yüksek hızlı tren ile gerçekleşen taşımacılıkta sadece yolcu talebinde değil YHT ağında da artış olmuştur. 2009 yılında Türkiye'de YHT uzunluğu 237 km iken 2022 yılında bu uzunluk 1232 km'ye çıkmıştır [16,17]. Dünya genelinde işletimde olan YHT uzunluklarında ise Çin 40000 km'yi aşan YHT uzunluğu ile ilk sırada yer almaktadır [17]. Hem dünyada hem de Türkiye'de gittikçe yaygınlaşan YHT'ye ait Türkiye'de yapım, proje, etüt aşaması gibi birçok aşamada devam eden projeler mevcuttur. Hem yolcunun hem de ülke ekonomisinin kazanım sağladığı YHT projesinin hayata geçmesinde ise birçok faktör incelenmektedir. Bu doğrultuda literatürde YHT, metro ve istasyon gibi raylı sistem ağıyla bağlantılı yer ve güzergâh seçimi ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur.

Wey ve arkadaşları tarafından Tayvan'da Bulanık AHP ve veri zarflama yöntemlerinin kullanılarak metro istasyonu için yer seçimi yapılmıştır. Çalışmada istasyon alanı, arazi kullanımı, ulaşım ve maliyet kriterleri dikkate alınmıştır [18]. Mateus ve arkadaşları Portekiz'de YHT istasyonu için alternatif lokasyonlar arasında en iyi istasyonu seçmek amacıyla inşaat aşamasında içsel (maliyet, risk, jeolojik vb.) ve dışsal (gürültü, titreşim, konut, trafik vb.) faktörler, işletim esnasında içsel (talep, erişilebilirlik, konfor vb.) ve dışsal (gürültü, titreşim, konut, trafik, erişilebilirlik vb.) faktörleri incelemiştir. Çalışmada çok kriterli yöntemlerden MACBETH yöntemi kullanılmıştır [19]. Hamurcu ve arkadaşları Türkiye'de çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP yöntemi ile istasyon yeri seçimi için kent merkezine yakınlık, erişilebilirlik, arazi yapısı, bölgenin genişleme potansiyeli, yatırım maliyeti, ekonomik katkı, güvenlik, çevresel faktörler, toplu taşıma imkânı ve kamulaştırma maliyeti kriterlerini kullanmıştır [20]. Shen ve arkadaşları istasyon yeri seçiminde Portekiz'de YHT istasyonu için bölgesel erişilebilirliğin gelişimi ve nüfusun gelişme potansiyeli gibi faktörleri değerlendirerek ajan tabanlı simülasyon tekniği ile öneride bulunmuştur [21]. Hamurcu ve arkadaşları Türkiye'de Ankara-Sivas YHT hattı için istasyon yeri seçiminde il ve ilçeleri içeren alternatif noktaların belirlenmesinde şehir merkezine yakınlık, güvenlik, ulaşım imkânı, kamulaştırma maliyeti ve erişilebilirlik kriterlerini kullanmıştır. Çalışmalarında AHP ve 0-1 hedef programlama kullanılmıştır [22].

Raylı sistemlerde güzergâh seçiminde de birçok çalışma yapılmıştır. Brunner ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada Hawai'nin Honolulu kentinde, Salt Lake ve havaalanı arasında raylı sistem için uygun güzergâh belirlemişlerdir. Belirledikleri güzergâhın seçiminde teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel kriterleri dikkate almışlardır. Karar vermede AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemini ve CBS'yi (Coğrafi Bilgi Sistemi) kullanmışlardır [23]. Sarımeşmet ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışmada ise, Kırıkkale YHT istasyonu güzergâhı için belirlenen kriterler üzerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilme yapılmış ve en uygun güzergâh seçilmiştir [24]. Ahmed ve Asmael 2015 yılında Irak'ın Bağdat şehri için metro güzergâhı seçiminde CBS'ye dayalı AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında güzergâhların belirlenmesinde çevresel, mühendislik ve ekonomik kriterleri dikkate alınmıştır [25]. Kays 2014 yılında Avustralya'nın doğu kesimindeki YHT istasyonu için optimum konumu belirlemede karma tamsayı optimizasyon modelini kullanarak maliyet tasarrufunu maksimize etmeye çalışmıştır [26].

YHT'ye yönelik güzergâh seçimi ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Eren ve arkadaşları tarafından hazırlanan bir çalışmada yapımı devam eden Ankara-Sivas YHT hattı güzergâhının değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirmede çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP kullanılmıştır. Mevcut ve yapılması düşünülen ulaşım projeleri ile entegrasyon, hattın geçtiği şehirler ve yakın bölge, bölgenin nüfus yoğunluğu, erişilebilirlik, yolculuk üreten önemli noktalara erişim ve talep kriterleri kullanılarak çok yönlü bir inceleme yapılmıştır [27]. 2015 yılında Saat ve Serrano, YHT hattı için optimum güzergâhın belirlenmesi amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Malezya'da YHT hatları için güzergâh seçiminde maliyet, nüfus ve ekonomi kriterlerini dikkate alarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden ELECTRE yöntemini kullanmışlardır [28].

Literatürde bir problemi çözmek amacıyla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri arasında Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. AHP yönteminin karmaşık problemleri çözebilmede etkili ve bu alanda yapılan çalışmalarda yaygın kullanımının olması bu çalışmada da tercih edilme sebeplerindedir. Çalışmada alternatif illerin bulunmasında kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı olan QGIS [29] ise mekânsal analizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde Türkiye'de YHT ile ilgili çalışmalar incelendiğinde yapılan çalışmaların daha çok güzergâh seçimiyle ilgili olduğu ve mekânsal analizin kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Hazırlanan bu araştırma makalesinin YHT ile ilgili yapılan diğer çalışmalardan farkı ise çalışmada YHT için il seçiminin yapılmış olması ve bu doğrultuda Türkiye'de demir yolu ağı ve yük istasyonları içeren tüm illeri kapsamasıdır. Ayrıca alternatif illerin tayini için Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı olan QGIS'in [29] kullanılmış olması da bu çalışmanın Türkiye'de YHT ile ilgili yapılan çalışmalardan farkıdır.

Türkiye'de YHT için en uygun il seçiminin yapılması amacıyla hazırlanan bu çalışmada uzman görüşlerinin ve ilgili çalışmaların dikkate alınmasıyla kriterler belirlenmiştir. Alternatif iller ise TCDD'den alınan Türkiye'deki demiryolu yük istasyonlarının, demiryolu ağının, yapım aşamasındaki ve işleme açılmış YHT projelerinin QGIS'e aktarılmasıyla belirlenmiştir. YHT için alternatif illerin belirlenmesinde böyle bir yol izlenmesi, çalışma sonucunda elde edilen en uygun ilde YHT ağının kolay bir şekilde faaliyete geçebilmesinin öngörülmesidir.

## 2. Metodoloji (Methodology)

YHT il seçimi için gerçekleşen bu çalışmada alternatif illerin belirlenmesi Coğrafi Bilgi Sistemi'nin QGIS yazılımıyla, elde edilen alternatif illerin belirlenen kriterler doğrultusunda sıralanması Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yönteminin kullanılmasıyla yapılmıştır.

### 2.1. Coğrafi bilgi sistemi (Geographic information system)

Açık kaynaklı bir coğrafi bilgi sistemi [29] olan QGIS, çalışmada YHT için alternatif illerin seçilmesinde kullanılmıştır. Alternatif iller, Türkiye'de demiryolu ağının, yük istasyonlarının ve herhangi bir YHT projesinin bulunduğu illerin dikkate alınmasıyla belirlenmiştir. Alternatif iller belirlenirken ilk olarak Türkiye'ye ait demir yolu ağı haritası üzerine TCDD'den alınan demir yolu yük istasyonlarının Google Map'ten alınan koordinatları QGIS'e nokta katman olarak aktarılmıştır. Bu işlem sonucunda 53 il elde edilmiştir. Bu illerden 22'sinde yapımı devam eden veya işleme açık YHT bulunmaktadır [15,30,31]. Demir yolu ağı ve yük istasyonuna sahip olan fakat herhangi bir YHT projesi olmayan (inşaat ve proje aşaması gibi) 31 il arasından alternatif iller, ulaşım ihtiyacının daha fazla olabileceği nüfus, turizm ve üniversitelerde öğrenim gören öğrenci sayısı parametrelerine göre bulunmuştur. İlgili kurumlardan temin edilen bu parametrelere ait 31 ilin verisi QGIS'e aktarılmış ve elde edilen sayısal veriden uzman görüşü yardımıyla QGIS'te seçim yapılmıştır. Bu işlemler doğrultusunda Türkiye'de en uygun YHT il seçiminde 14 il, bu çalışmada alternatif il olarak belirlenmiştir.

### 2.2. Analitik hiyerarşi prosesi (Analytical hierarchy process)

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan AHP, 1971 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiştir. AHP, karar vericilerin karmaşık problemler arasındaki ilişkiyi, problemin ana amacını, kriterlerini, alt kriterlerini ve alternatiflerini gösteren hiyerarşik bir yapıda modellemesine olanak sağlayan bir yöntemdir [32]. Zor ve anlaşılması güç problemleri çözebilen [33], sıralama ve en uygun alternatifi seçmeyi mümkün kılan AHP'nin en büyük avantajlarından biri, karar vericilerin karmaşık bir konuyu daha basit bir şekilde ayırmasına yardımcı olmasıdır [34]. AHP tekniğinin uygulanmasında ilk olarak bir hiyerarşi oluşturulmaktadır. Hiyerarşide amaç, kriterler ve alternatifler belirlenir [35]. Hiyerarşi oluşturulduktan sonra kriterlerin ve alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır. İkili karşılaştırma esnasında, değerlendirmede yer alan uzmanların tarafsız olması gereklidir [36]. Problemin çözümü için belirlenen kriterler ve her kriter için alternatif illerin ikili karşılaştırması Tablo 1.'de verilen Saaty'nin önem skalasındaki puanlamaya göre yapılmaktadır [35]. Bu tabloya göre puanlama yapıldıktan sonra tutarlılık hesaplanmakta ve son olarak elde edilen sıralamaya göre en uygun alternatif belirlenmektedir [36].

Tablo 1. Saaty'nin önem skalası [35] (Saaty's importance scale)

Ölçek/Skala	Sayısal Önem Değeri	Karşıt Önem Değeri
Eşit öneme sahip	1	1
Zayıf ya da hafif	2	1/2
Biraz önemli	3	1/3
Makul	4	1/4
Fazla önemli	5	1/5
Güçlü	6	1/6
Çok fazla önemli	7	1/7
Çok çok güçlü	8	1/8
Son derece önemli	9	1/9

YHT il seçimi için belirlenen kriterlerin birbirine göre üstünlükleri Saaty'nin önem skalası kullanılarak ulaşım alanında çalışan uzmanlar tarafından değerlendirilmiştir. Kriterlerin değerlendirmesini yapan uzmanlar yüksek öğretim kurumlarında ulaşım alanında çalışan akademisyenlerden (2 kişi) ve TCDD bünyesinde ulaşım planlaması üzerine karar verici mekanizmalarda çalışan (3 kişi) kişilerden oluşmaktadır. Kriterlerin birbirine göre durumları, uzman kişilerin bilgileri, deneyimleri ve görüşleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Elde edilen değerlendirmelerin geometrik ortalaması ile AHP yöntemi uygulanmıştır. Alternatif illerin birbirine göre üstünlükleri ise her kriter için ilgili kurumlardan alınan verinin oransal olarak ikili karşılaştırılmasıyla elde edilmiştir. İkili karşılaştırma sonuçları Super Decision'a aktarılarak YHT için en uygun il sıralaması bulunmuştur.



### 3. Bulgular (Findings)

YHT il seçimi için yapılan bu çalışmada alternatif illerin elde edilmesinde QGIS'te gerçekleşen aşamalar, belirlenen kriterlerin AHP doğrultusunda birbirine göre üstünlükleri ve alternatif illerin sıralaması aşağıda yer almaktadır.

#### 3.1. YHT için alternatif iller

Yapılan bu çalışmada Türkiye'de bulunan 81 ilde demir yolu yük istasyonunun ve demir yolu ağının bulunup bulunmaması, herhangi bir YHT projesinin olup olmaması ve uzmanlar tarafından belirlenen birey yoğunluğunu etkileyen parametrelerin dikkate alınması ile alternatif iller elde edilmiştir. Şekil 2'de Türkiye'de demiryolu ağı ve demir yolu yük istasyonları bulunan iller yeşil renk ile gösterilmektedir.



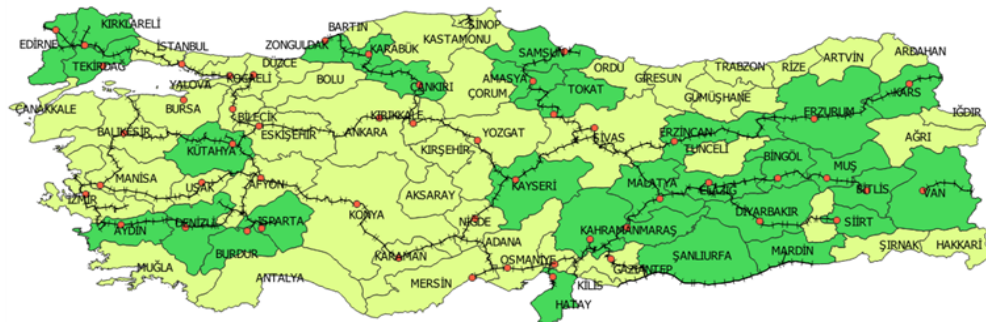
Şekil 2. Türkiye'de demir yolu yük istasyonu ve demir yolu ağı bulunan iller  
(Provinces with railway freight stations and railway network in Türkiye)

Şekil 2 incelendiğinde demir yolu ağı ve demir yolu yük istasyonu bulunan 53 il yeşil renk ile gösterilmiştir. Bu iller arasında işleme açık YHT, yapım aşamasında YHT ve YHT projesi olan iller Şekil 3'te koyu yeşil renkle gösterilmiştir.



Şekil 3. Türkiye'de YHT bulunan iller  
(Provinces with HST in Türkiye)

Şekil 3 incelendiğinde koyu yeşil ile gösterilen 22 il herhangi bir YHT projesine sahiptir. Demir yolu ağına sahip olmasına rağmen herhangi bir YHT projesi bulunmayan iller ise Şekil 4'te yeşil renkte gösterilmektedir.





Şekil 4. Türkiye’de YHT projesi bulunmayan iller  
(Provinces that do not have a HST project in Türkiye)

Şekil 4 incelendiğinde demir yolu ağına ve demir yolu yük istasyonuna sahip olmasına rağmen herhangi bir YHT projesi olmayan 31 il elde edilmiştir. Bu illerde ulaşım ihtiyacıyla doğru orantılı olabilecek birey yoğunluğu dikkate alınmıştır. Bu kapsamda Şekil 4’teki iller arasında turizm, nüfus ve üniversitelerde öğrenim gören öğrenci sayısı parametrelerinin alanında uzman kişiler tarafından dikkate alınmasıyla alternatif iller elde edilmiştir. Şekil 5’te bu çalışmada YHT il seçimi için belirlenen 14 alternatif il yeşil renkle gösterilmektedir.

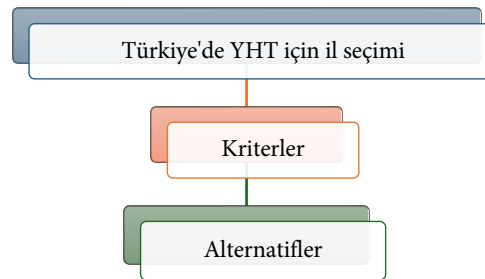


Şekil 5. Türkiye’de YHT için alternatif iller  
(Alternative provinces for HST in Türkiye)

Şekil 5’e göre YHT için alternatif iller Adıyaman, Aydın, Diyarbakır, Edirne, Erzurum, Hatay, Kayseri, Kütahya, Malatya, Şanlıurfa, Tekirdağ, Tokat, Van ve Zonguldak olarak bulunmuştur.

### 3.2. YHT için AHP metodu

Türkiye’de YHT il seçimi için yapılan bu çalışmada kullanılan AHP metoduna göre oluşturulan hiyerarşi Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. YHT için AHP hiyerarşisi  
(AHP design for HST)

Şekil 6’da gösterilen AHP hiyerarşisinde ilk sırada amaç, ikinci sırada kriterler ve son sırada ise alternatifler yer almaktadır.

#### 3.2.1. YHT için belirlenen kriterler

Çalışmada literatür incelenmiş ve uzman görüşleri doğrultusunda kriterler belirlenmiştir. YHT için bu çalışmada kriterler “Mesafe”, “Nüfus”, “Sosyo-gelişmişlik düzeyi”, “Öğrenci sayısı” ve “Turizm” olarak belirlenmiştir. Kriterler belirlenirken ise birçok unsur göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmada YHT il seçimi için genel olarak ulaşımın daha fazla ihtiyaç duyulabileceği durumlar dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda bireylerin yer değişiminin, yoğun hareketliliğin meydana gelmesini etkileyen faktörler kriter tercihinde etkili olmuş ve “Nüfus”, “Turizm” ve “Öğrenci sayısı” çalışmada kriter olarak belirlenmiştir. Ekonomi, sağlık, istihdam gibi unsurlar ise çalışmada belirlenen “Sosyo-gelişmişlik düzeyi” kriteri kapsamındadır [30]. Bu sebeple bu faktörler tek bir kriter olan “Sosyo-gelişmişlik düzeyi” kriteri altında birleştirilmiştir. Mesafe kriterinin tercih edilmesindeki sebep ise işletimde olan YHT ili ile çalışmaya göre YHT yapımının uygun olduğu il arasında, YHT bağlantısının daha kolay kurulabilmesinin ve böylelikle daha kolay faaliyete geçmesinin öngörülmesidir. Çalışmada kullanılan kriterlere ait sayısal verinin elde edildiği ilgili kurumlar

aşağıda yer almaktadır.

**Mesafe:** YHT yapılması planlanan il ile işletmeye açılan yüksek hızlı trenin bulunduğu il arasındaki karayolu mesafesini ifade etmektedir. Veri, KGM'den [37] elde edilmiştir.

**Nüfus:** YHT'nin yapılması planlandığı ilin nüfusunu tanımlamaktadır. Veri, TÜİK'ten elde edilmiştir [38].

**Sosyo-gelişmişlik düzeyi:** YHT'nin yapılması planlandığı ilin sosyo-gelişmişlik düzeyini belirtmektedir. Veri, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'ndan temin edilmiştir [39].

**Öğrenci sayısı:** YHT yapılması planlanan ilde öğrenim gören üniversite öğrenci sayısını ifade etmektedir. Veri, YÖK'ten alınmıştır [40].

**Turizm:** YHT yapılması planlanan ildeki turistik konaklarda kalan kişi sayısı olarak tanımlanmaktadır. Veri, TÜİK'ten elde edilmiştir [41].

### 3.2.2. Kriterlerin önem ağırlıkları

Yüksek hızlı tren il seçimi için alternatif iller, uzman kişilerce değerlendirilen kriterlerin birbirine göre durumları ve her kriter için ilgili kurumdan alınan veriler doğrultusunda AHP yöntemi ile sıralanmıştır. Kriterlerin birbirine göre önem durumları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Table 2. Kriterlerin önem ağırlıkları (Importance weights of the criteria)

Kriterler	Önem ağırlıkları
Turizm	0,433926637
Öğrenci Sayısı	0,217290692
Sosyal gelişim düzeyi	0,193175729
Nüfus	0,116240411
Mesafe	0,03936653

Tablo 2'ye göre 'Turizm' kriteri ilk sırada yer almaktadır. İllerin 'Öğrenci sayısı' ve 'Sosyo-gelişmişlik seviyesi' birbirine yakın bulunmuştur. 'Nüfus' kriteri ise 4. sıradadır. 'Mesafe' kriteri ise 5.sırada yer almakta olup diğer kriterlere göre büyük bir orana sahip bulunmamıştır.

### 3.2.3. YHT için alternatif illerin sıralaması

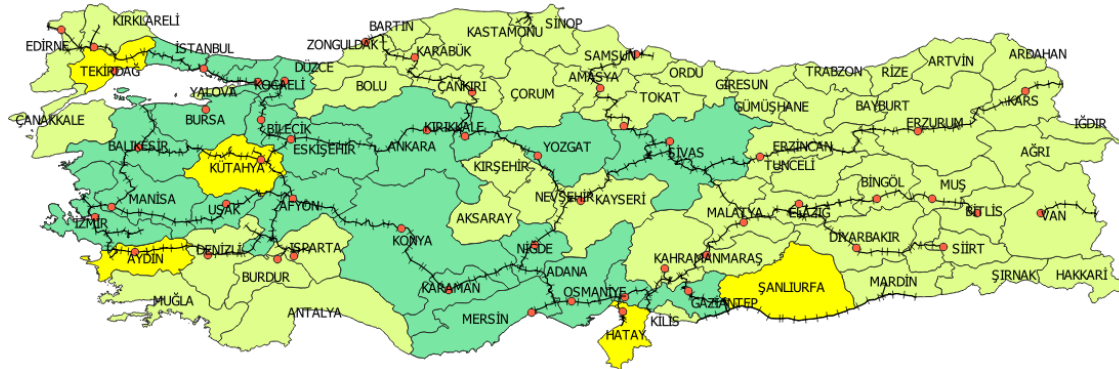
Tablo 3'te YHT ili için alternatif illerin sıralaması verilmiştir. Tablo 3'e göre Aydın ilk sırada yer almakta olup Aydın'ı Hatay takip etmektedir. Şanlıurfa, Tekirdağ ve Kütahya ise yüksek hızlı tren için birbirine göre yakın değerlerde bulunmuştur.

Tablo 3. Alternatif illerin sıralaması (Ranking of alternative provinces)

Sıra	Alternatif İller	Önem ağırlıkları
1	Aydın	0,123664
2	Hatay	0,092111
3	Şanlıurfa	0,083573
4	Tekirdağ	0,081409
5	Kütahya	0,080347
6	Kayseri	0,074808
7	Edirne	0,073838
8	Erzurum	0,072042
9	Diyarbakır	0,06111
10	Zonguldak	0,054244

11	Van	0,052932
12	Tokat	0,052792
13	Malatya	0,052146
14	Adıyaman	0,044982

Şekil 7’de projesi, yapımı ve işleme alınan YHT’si olan iller mavi renkle, bu çalışma sonucunda YHT’ye uygun bulunan ilk beş il ise sarı renkle gösterilmiştir.



Şekil 7. YHT için uygun bulunan iller  
(Provinces that are suitable for HST)

Şekil 7’den anlaşıldığı üzere, Türkiye’de işleme açık, yapım ve proje aşamasında olan yüksek hızlı tren illeri ile bu çalışma sonucuna göre elde edilen sarı renk ile gösterilen illerin birbiri ile sınır komşusu olması, çalışma sonuçlarına göre önerilen bu illerde yüksek hızlı tren projelerinin hayata geçirilmesinin kolay ve uygun olduğunu göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar (Results)

Küreselleşen dünyada taşımacılık sektörünün birçok sektörle bağlantısı vardır ve taşımacılık sektörü dolaylı veya doğrudan birçok sektörü etkileyebilir. Taşımacılık sektöründe demir yolu ulaşım sistemleri öne çıkarken, demir yolunda ise güvenli, konforlu, çevre dostu ve seyahat süreleri gibi çeşitli faydalar nedeniyle daha verimli ulaşım olanakları sağlayan YHT’ler son yıllarda ön plana çıkmıştır. YHT ağlarının çeşitli avantajlar sağlaması nedeniyle, dünyanın dört bir yanındaki ülkeler çeşitli yatırımlar yapmakta ve YHT ağlarını genişletecek projelerin gerçekleştirilmesi için büyük bütçeler ayırmaktadır [22]. Ayrıca ülkeler, bunun için çeşitli yaklaşım ve metodolojiler kullanarak, alternatifler arasından en verimli il ve istasyonu seçmek için doğru illere YHT kurmak istemektedir. Çünkü ulaşımdaki verimliliği ve diğer sektörlerle olan alaka düzeyini dikkate alarak etkin bir yer seçimi yapmak kaçınılmaz bir gerekliliktir. Bu sayede kaynakları en uygun şekilde kullanmak mümkündür.

YHT için en uygun ili bulmak amacıyla yapılan bu çalışmada değerlendirilen kriterler arasında en yüksek değer ‘Turizm’ kriterine ait bulunmuştur. Bu durumda bu çalışmaya göre yüksek hızlı tren için il seçiminde turizm yoğunluğu belirleyici bir faktör olmuştur. YHT için en uygun ili bulmak amacıyla alternatif illerin sıralanmasında ise ilk sırada ‘Aydın’ ili bulunmuştur. İkinci sırada ‘Hatay’ ili yer almakta olup bu sıralamayı birbirine oldukça yakın değere sahip olan ‘Şanlıurfa’, ‘Tekirdağ’ ve ‘Kütahya’ illeri takip etmektedir. Gelecek YHT planlaması açısından bu sonucun karar vericiler için belirlenen kriterlere ve alternatiflere göre en uygun sonuç olduğu elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın ülkemizde rağbet edilen YHT planlamasına katkı sağlamasının yanı sıra farklı metodolojiler ve farklı kriterler de dikkate alınarak gelecekte yüksek hızlı tren ağ planlamasına yönelik farklı çalışmalara da katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Çalışmanın sınırlılıkları: Çalışmada YHT için belirlenen kriterler, bu kriterlerin uzmanların kendi görüşleri doğrultusunda değerlendirilmesi, alternatif illerin sadece demir yolu ağı ve demir yolu yük istasyonları bulunan iller arasından seçilmesidir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] Z. Hang, "The impact of the high speed train in China," in *2011 International Conference on Management and Service Science*, Wuhan, China, 12-14 August 2011, *IEEE*, 2011. pp. 1-3. doi: [10.1109/ICMSS.2011.5998237](https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5998237)
- [2] N. Ivanov, I. Boiko and A. Shashurin, "The problem of high-speed railway noise prediction and reduction," *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 539-546, 2017. doi: [10.1016/j.proeng.2017.05.086](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.086)
- [3] M. F. Altan and M. Ç. Kızıldaş, "Yüksek hızlı demiryolları, yolcu ve yük taşımacılığı karşılaştırmaları bağlamında küresel ölçekli bir derleme çalışması," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol.11, no.1, pp.319-328, 2020. doi: [10.24012/dumf.404832](https://doi.org/10.24012/dumf.404832)
- [4] M. İnan and M. Demir, "Demiryolu ulaşımı ve türkiye'de hızlı tren yatırımlarının etkileri: Eskişehir-Konya örneği," *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol:27, no:1, pp. 99-120, 2017. doi: [10.18069/firatsbed.346415](https://doi.org/10.18069/firatsbed.346415)
- [5] B. Paçacı, S. Erol and M.K. Çubuk, "Sürdürülebilir ulaşım ile lojistik merkez yer seçimi," *Toros Üniversitesi İİSBF Sosyal Bilimler Dergisi*, Uluslararası Sürdürülebilir Lojistik "Döğüsel Ekonomi" Sempozyumu Özel Sayı, vol:9, no:2, pp. 97-106, 2022. doi: [10.54709/iisbf.1182554](https://doi.org/10.54709/iisbf.1182554)
- [6] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Türkiye'nin Yedinci Ulusal Bildirimi," <https://webdosya.csb.gov.tr/>, 2018. Available: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/yed-nc-ulusal-b-ld-r-m-20190909092640.pdf> [Accessed: 10 Oct. 2023].
- [7] H.B. Tosun, "Türkiye'de yüksek hızlı trenlerin önemi ve diğer ulaşım türleri arasındaki tercih nedenleri," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol:9, no:3, pp. 383-392, 2021. doi: [10.29130/dubited.873692](https://doi.org/10.29130/dubited.873692)
- [8] H. Aydemir and M.K. Çubuk, "Karayollarının Türkiye'de genel durumunun araştırılması ile yaşanan değişimler ve gelecek stratejilerine dair tavsiyeler," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol:2, no:3, pp. 129-146, 2016.
- [9] Y. Sarı, A. Kılıçlar and C. Seçilmiş, "Yüksek hızlı tren (YHT) yolcularının kişisel değişkenler açısından memnuniyet algılamalarının değerlendirilmesi," *Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi*, vol:22, no:2, pp. 127-138, 2011.
- [10] H. Tüdeş Yaman and G. Dalkıç, "Evaluation of the pricing preferences and value of time for High Speed Rail (HSR) users in Turkey," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol:34, 2019. doi: [10.17341/gazimmfd.416487](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416487)
- [11] A.Y. Gündüz, M. Kaya and C. Aydemir, "Kentçi ulaşımında karayolu ulaşımına alternatif sistem: Raylı ulaşım sistemi," *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, vol:2, no:1, pp. 134-151, 2011.
- [12] Y. Sürmen, *Taşıma İşletmeleri Muhasebesi*, Kocaeli: Umuttepe Yayınları, 2015.
- [13] K. Ş. Oruç, "Hızlı trenin neden olduğu çevresel gürültü kirliliği," Yüksek lisans tezi, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2017.
- [14] M. Garmendia, C. Ribalaygua and J.M. Ureña, "High speed rail: implication for cities," *Cities*, Vol:29, pp. 26-31, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.06.005>
- [15] TCDD, "2017-2021 İstatistik yıllığı," Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/istapor/ist20172021.pdf> [Accessed: 08 Sept.2022].
- [16] TCDD, *YHT Ağı*. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/> [Accessed:2022].
- [17] UIC, "High speed lines in the world 2022 (Summary)," Available: [https://uic.org/IMG/pdf/20231001\\_high\\_speed\\_lines\\_in\\_the\\_world.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/20231001_high_speed_lines_in_the_world.pdf) [Accessed: 11 Oct. 2023].
- [18] W. M. Wey, "Smart growth and transit-oriented development planning in site selection for a new metro transit station in Taipei, Taiwan," *Habitat International*, vol:47, pp. 158-168, 2015. doi: [10.1016/j.habitatint.2015.01.020](https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.01.020)
- [19] R. Mateus, J.A. Ferreira and J. Carreira, "Multicriteria decision analysis (MCDA): Central Porto high-speed railway station," *European Journal of Operational Research*, vol.187, no.1, pp. 1-18, 2008. doi: [10.1016/j.ejor.2007.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.006)
- [20] T. Eren, M. Hamurcu and H.M. Alağaç. "Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Kırıkkale yüksek hızlı tren istasyon yerinin seçimi," in *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku, Azerbaijan, 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan)*, 2017, pp. 597-606.
- [21] Y. Shen, J.d.A. e Silva and L.M. Martínez, "HSR station location choice and its local land use impacts on small cities: A case study of Aveiro, Portugal," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol:111, pp. 470-479, 2014. doi: [10.1016/j.sbspro.2014.01.080](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.080)
- [22] S. Dinç, M. Hamurcu and T. Eren, "Ankara-Sivas yüksek hızlı tren hattında istasyon yerlerinin seçiminde çok kriterli karar verme destekli 0-1 hedef programlama modeli," *Demiryolu Mühendisliği*, vol:9, pp. 1-16, 2019.
- [23] I. M. Brunner, K. Kim and E. Yamashita, "Analytic hierarchy process and geographic information systems to identify optimal transit alignments," *Transportation research record*, vol: 2215, no:1, pp. 59-66, 2011. doi: [10.3141/2215-06](https://doi.org/10.3141/2215-06)

- [24] B. Sarımeahmet, M. Hamurcu and T. Eren, "Çok kriterli karar verme: Kırıkkale YHT istasyonu-şehir bağlantısının sağlanması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol:11, pp. 26-40, 2020.
- [25] N. G. Ahmed and N.M. Asmael, "A GIS-assisted optimal Baghdad metro route selection based on multi criteria decision making," *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol:19, no:6, pp. 44-58, 2015.
- [26] J. T., Kays, "Optimal locations of high-speed railway stations along Australias East Coast," *The Australian Mathematical Sciences Institute (AMSI)*, February, 2014. Available: [https://vrs18.amsi.org.au/wp-content/uploads/sites/6/2014/09/Kays\\_AMSI-Paper.pdf](https://vrs18.amsi.org.au/wp-content/uploads/sites/6/2014/09/Kays_AMSI-Paper.pdf) [Accessed: 02 Augst. 2024].
- [27] N. İ. Süt, M. Hamurcu and T. Eren "Analitik hiyerarşi süreci kullanılarak Ankara-Sivas yüksek hızlı tren hat güzergahının değerlendirilmesi," *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, vol:3, no:3, pp. 22-30, 2018.
- [28] M. R. Saat and J. Aguilar Serrano, "Multicriteria high-speed rail route selection: application to Malaysia's high-speed rail corridor prioritization," *Transportation Planning and Technology*, vol:38, no:2, pp. 200-213, 2015. doi: [10.1080/03081060.2014.997446](https://doi.org/10.1080/03081060.2014.997446)
- [29] QGIS. Available: [https://docs.qgis.org/2.18/tr/docs/user\\_manual/preamble/foreword.html](https://docs.qgis.org/2.18/tr/docs/user_manual/preamble/foreword.html) [Accessed: 05 Jul. 2024].
- [30] TCDD, *Yapımı Devam Eden Projeler*. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/projeler> [Accessed: 10 Dec. 2022].
- [31] TCDD, "Projects", *tcdd.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/> [Accessed:10 Dec. 2022].
- [32] A. Kuruüzüm and N. Atsan, "Analitik hiyerarşi yöntemi ve işletmecilik alanındaki uygulamaları," *Akdeniz İİBF dergisi*, vol:1, no:1, pp. 83-105, 2001.
- [33] M., Çetinbaş, "Çok kriterli karar verme yöntemleriyle ilgili excel uygulaması," *Pamukkale İşletme ve Bilişim Yönetimi Dergisi*, vol:4, no:1, pp. 12-29, 2017.
- [34] M. J. Liberatore and R.L. Nydick, "An analytic hierarchy approach for evaluating product formulations," *Computer Aided Formulation: A Manual for Implementation*, Alan H. Bohl, ed. VCH Publishing Company, 1990.
- [35] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of mathematical psychology*, vol:15, no:3, pp. 234-281, 1977. doi: [10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- [36] O. Kalan, "Analitik hiyerarşi prosesi ile Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattı için istasyon yeri seçimi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol.39, no:1, pp. 31-45, 2024. doi: [10.21605/cukurovaumfd.1459347](https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1459347)
- [37] KGM, "Mesafe Sorgulama", *kgm.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Uzakliklar/ilcedenIlceyeMesafe.aspx> [Accessed: 12 Dec. 2022].
- [38] TUIK, "Nüfus ve Demografi", *tuik.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1> [Accessed:12 Dec. 2022].
- [39] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırmaları (SEGE)", *sanayi.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://www.sanayi.gov.tr/merkez-birimi/b94224510b7b/sege> [Accessed: 18 Nov. 2022].
- [40] YÖK, "Öğrenci Sayısı", *yok.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://istatistik.yok.gov.tr/> [Accessed: 18 Nov. 2022].
- [41] TUIK, "Turizm İstatistikleri", *tuik.gov.tr*, 2022. [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Egitim.-Kultur.-Spor-ve-Turizm-105> [Accessed: 24 Dec. 2022].

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Experimental Investigation of the Joining of SPH440-OD Steel with MAG Welding in the Scope of Microstructure and Mechanical Properties

Mustafa Bayram Kaya<sup>a\*</sup>, Muhammed Elitas<sup>b</sup>

Submitted: 4.07.2024 Revised: 30.07.2024 Accepted: 03.09.2024 doi:10.30855/0705AR06

### ABSTRACT

**Keywords:** SPH440-OD steel, MAG welding, Microstructure, Mechanical properties, Experimental investigation

<sup>a,\*</sup> Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, Dept. of Mechanical Engineering, 11100, Bilecik, Türkiye  
Orcid: 0009-0003-9093-4121  
e mail: mustafabayram9898@hotmail.com

<sup>b</sup> Bilecik Seyh Edebali University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering, 11100 - Bilecik, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-5358-1783

\*Corresponding author: mustafabayram9898@hotmail.com

In this study, the microstructure and mechanical properties of SPH440-OD steel joined by MAG welding method were experimentally examined through tensile, metallography and microhardness tests. In the welding process, welding voltage and wire speed were accepted as variable welding parameters and welding applications were carried out in 9 different variations. After the welding process, test samples were cut from the welded plates obtained from variable welding parameters and tensile and microhardness tests were applied to experimentally examine the mechanical properties of the samples. With the metallography experiment on the samples, Base Metal (BM), Weld Metal (WM), Heat Affected Zone (HAZ) microstructure images were obtained under an optical microscope. As a result of experimental investigations, it has been observed that different welding parameters set also affect the mechanical properties of the structures (percent elongation/tensile strength) and the quality of the weld seam. When the samples were examined in tensile tests, it was seen that the rupture generally occurred in BM. Unlike BM, denser and larger in grain forms were observed in HAZ. Columnar grain structure formations were observed in the WM microstructure. It was observed that the hardness of the samples increased from BM to HAZ and from HAZ to WM.

## SPH440-OD Çeliğinin MAG Kaynağı ile Birleştirilmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Kapsamında Deneysel Olarak İncelenmesi

### ÖZ

Bu çalışmada, MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen SPH440-OD çeliğinin çekme, metalografi ve mikrosertlik deneyleri ile mikroyapı ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Kaynak işleminde kaynak gerilimi, tel hızı değişken kaynak parametreleri olarak kabul edilmiş ve 9 farklı varyasyonda kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinden sonra değişken kaynak parametrelerinden elde edilen kaynaklı plakalardan tel erozyon tekniği ile deney numuneleri kesilerek, numunelerin mekanik özelliklerini deneysel olarak inceleyebilmek için çekme ve mikrosertlik deneyleri uygulanmıştır. Numuneler üzerinde metalografi deneyi ile optik mikroskopta Esas Metal (EM), Kaynak Metali (KM), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Deneysel incelemeler sonucunda, ayarlanmış farklı kaynak parametrelerinin yapıların mekanik özelliklerini (yüzde uzama/çekme dayanımı) ve kaynak dikişinin kalitesini de etkilediği görülmüştür. Numuneler incelendiğinde kopmanın genel olarak EM’de gerçekleştiği görülmüştür. Ek olarak, EM’den farklı olarak ITAB’da tane formlarında sıklaşma ve büyüme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca KM mikroyapısında ise kolonsal tane yapı oluşumlarının olduğu görülmüştür. Numunelerde EM’den, ITAB’a, ITAB’dan KM’ye doğru sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** SPH440-OD çeliği, MAG kaynağı, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Deneysel inceleme



## 1. Giriş (Introduction)

SPH440-OD çeliği sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen otomotiv sektöründe şerit ve levha uygulamalarında sınıflandırılmış, presleme ve dayanım özellikleri bakımından otomobil şasi ve tekerleklerinde vb. kullanım alanlarına sahip, endüstri standartına göre farklı kaynaklar incelendiğinde Japanese Industrial Standart (JIS) G3113 standardına uyan, Toyota üretim kodlandırmasına göre ise TSG3100G olarak tanımlanan yapısal çelik sınıfında yer alan rulo tipi sac çeliğidir [1-4].

Havanın etki ettiği olumsuz durumlardan kaynağı korumak amacıyla koruyucu gaz türlerinin kullanıldığı gaz altı ark kaynağı yöntemi olan MIG/MAG kaynağının uygulanma yöntemi ya da çalışma mantığı, kaynak torcu aracılığıyla devamlı beslenen tel elektrodun kaynak arki oluşumuyla ergimesi şeklinde açıklanabilir. Kaynak için gereken ısı, tel elektrodla kaynaklanacak malzeme arasında oluşan kaynak arkıyla bu esnada tel elektrottan geçen akımında direnç göstermesi sonucu bu etmenlerin birbirleriyle ilişkisi sayesinde elde edilir. MIG/MAG kaynakları arasındaki fark incelenirse eğer aralarındaki isimlendirme farkları ortaya çıkmaktadır. İsimlendirmelerinde aktif ve asal koruyucu gaz türlerinin kullanılmasından dolayı farklılık vardır. MAG kaynağının Metal Aktif Gaz olarak açılımı yapılmaktadır ve bu kaynakta belli miktarlarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) koruyucu gazı kullanılarak kaynak işlemleri yapılmaktadır. MIG kaynağının ise Metal Inert Gaz olarak açılımı yapılmaktadır ve Argon (Ar) ve Helyum (He) soygazlarının belli miktarlarda tek başına veya karışım halinde kullanılması ile kaynak işlemleri gerçekleştirilmektedir. MIG/MAG kaynaklarında kaynak donanımları benzer olsa bile (CO<sub>2</sub>) gazı içeren koruyucu gaz tüplerinin dışında ısıtıcı bulunmaktadır [5,6].

Geniş bir alanda kullanıma sahip olan MIG/MAG kaynağı, metal sektörü, otomotiv, konteyner ve çelik imalatı vb. uygulanmaktadır. Sektörel bazda bu kadar yaygın kullanım göstermesi farklı boyutlarda farklı malzemelerin kaynaklanmasına olanak sağlamasından dolayıdır [7]. Demir ve demir dışı malzemelerin kaynağında, alaşım malzemelerin kaynaklanmasında uygulanabilmektedir. Yarı otomatik (elle yapılan) kaynak işlemlerinde uygulamanın kolay olmasının kaynakçı için zorluk çıkarmaması MIG/MAG kaynağının yaygın kullanım elde etmesini sağlamıştır. Kaynakçı topraklama aparatını kaynaklanacak iş parçasına bağladıktan sonra kaynak torcundan iletilen tel elektrodu birleştirme yapılacak alana dokundurması kaynağın başlaması için yeterlidir [5].

MIG/MAG kaynağı aşağıda belirtilen bazı avantajları sebebiyle yaygın kullanıma sahiptir. Örnekler vermek gerekirse, sürekli beslenen tel elektrod kullanımı, sınırlı uzunlukta elektrod kullanılan elektrik ark kaynağına göre avantajlı olmasını sağlamaktadır ayrıca metal aktarımı, tel besleme hızının yüksek olması ve kaynak hızının yüksek olması özellikleri de elektrik ark kaynağına göre avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu kaynak türünde aksel yönlerin tümünde kaynak işlemi yapılabilmektedir ayrıca kaynak esnasında çapaklanma durumunun olmaması kaynak pasolarının temizlenmesindeki sürenin kısalmasını sağlamaktadır. Uygulanmasının kolay olmasından dolayı da avantajlıdır. MIG/MAG kaynağında özlü tip elektrod kullanımı ile yapılan kaynaklarda KM'nin özelliklerinin daha kaliteli olması sağlanabilmektedir [5,8].

Literatürden SPH440-OD çeliği ile ilgili yapılan kaynak çalışmaları incelendiğinde, otomotiv sektöründe kullanılan çeliklerin robot ark kaynağı [9] ve punta kaynağı [10] ile ilgili çalışmalarının olduğu görülmüştür. Okuyan ve Uzun [9], çalışmalarında otomobil koltuk kasnağında bulunan SPH440 çelik destek laması ile STKM800 boru profilini en uygun kaynak nüfuziyetinin sağlanması amacıyla kaynak hızı, kaynak akımı ve kaynak gerilimi değerlerini farklı kombinasyonlarda robot ark kaynağı tekniğini kullanarak ayarlamışlardır ve bu kaynak türünü birleştirme işleminde kullanmışlardır. Sonuç olarak, en uygun kaynak nüfuziyet değerlerinin sağlandığı kaynak akımı, kaynak hızı ve gerilim değerlerini elde etmişlerdir. Kasih ve arkadaşları [10], çalışmalarında otomotiv endüstrisinde otomobil kaportasında kullanılan SPC440 0,9 mm sac ile SPH440 2,9 mm kalınlığındaki sacları punta kaynağı ile birleştirmişlerdir. Sac malzemelerin ölçülerini 110x20 mm olarak tercih etmişlerdir. Kaynaklı numunelere çekme makaslama deneyi uygulamışlardır. Sonuç olarak, kaynak işleminde en uygun kaynak parametre değerlerini (kaynak süresi, kaynak akımı ve elektrod kuvveti) Taguchi tekniğini kullanarak optimize etmiş, yaptıkları hesaplamalara göre en uygun şartlarda kaynak işlemini uygulamışlardır.

Ek olarak yapı çelikleri kapsamında MIG/MAG kaynağı ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, Gür [11], çalışmasında 10 mm kalınlığındaki S700 MC yapı çeliğini kullanmıştır. Kaynak öncesinde ısı

girdisini hesaplayarak kaynak işlemine uygun parametreleri belirledikten sonra köşe ve alın türünde %92 Ar + %8 CO<sub>2</sub> koruyucu gazı altında MIG kaynağı birleştirme işlemleri gerçekleştirmiştir. Köşe ve alın kaynağı numunelerinin mikroyapı ve makro yapı incelemelerini kaynak hatalarını görme kapsamında uygulamıştır. Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında ise Vickers sertlik deneyi ile birlikte kırma, charpy çentik darbe, eğme ve enine çekme deneylerini uygulamıştır. Sonuç olarak, en az sertliğin ITAB'da gerçekleştiğini, en fazla darbe sönümlenme enerji değerinin de aynı şekilde ITAB'da gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Mikroyapı incelemelerinde ise ani soğuma durumunun tane yapı formunda küçülmeye neden olduğunu böylelikle dayanımda da yükselme olduğunu belirtmiştir. Işık [12], çalışmasında St52 yapı çeliğini bazik ve rutil türde özlü tel elektrodlar kullanarak farklı akım ve kaynak gerilimi %100 CO<sub>2</sub> koruyucu gazı koşullarında MAG kaynağı işlemi ile birleştirme işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışmasında özlü tel elektrod türünün kaynak dikişine etkisini mekanik özelliklerinin incelenmesi kapsamında çekme, sertlik, eğme ve çentik darbe deneyleri ile gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, çekme deneylerinde kopmaların EM'de oluştuğunu gözlemlemiştir. EM'ye etki eden yüksek ısı girdi etkisine göre bazik tel elektrodarda maksimum çekme mukavemetinin EM'ye yaklaşık geldiğini, rutil özlü tel elektrodarda ise EM'den yaklaşık olarak %2 daha yüksek geldiğini belirtmiştir. Sertlik deneyi sonucunda ise ITAB kaynak dikişi sınır bölgesinde ise sertliğin en yüksek değeri verdiğini gözlemlemiştir. Dar kaynak kenarından EM'ye doğru sertliğin düştüğünü gözlemlemiştir. Kaynak bölgesinde sertlik incelemesinde ise iki farklı özlü tel elektrodun yaklaşık olarak denk sertlik sonucu verdiğini ancak bazik tel elektrodlu kaynaklı numunelerin rutil tel elektrodlu olanlara göre yaklaşık % 10 daha fazla sertlik değeri verdiğini belirtmiştir. Eleman [13], çalışmasında iki farklı kalınlıkta S355J2+N yapı çeliklerini kullanmıştır. MIG/MAG kaynak makineleri (yeni nesil ve geleneksel) ile alın ve köşe tiplerinde %82 Ar + %18 CO<sub>2</sub> koruyucu gaz şartlarında ve SG 2 tel elektrodunu kullanarak kaynak işlemlerini gerçekleştirmiştir. Mekanik özellik incelemeleri kapsamında eğme, çekme, sertlik ve çentik darbe deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, kaynak nüfuziyeti bakımından yeni nesil makinelerinin daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca çekme deneyinde yeni nesil makinelerde kopmanın EM'de meydana geldiğini, geleneksel makinelerde ise KM'de oluştuğunu belirtmiştir. Sertlik deneyinde ise hem yeni nesil hem de geleneksel makineler açısından numunelerde kaynaklı birleştirme bölgelerinin sertliğinin en yüksek olduğunu belirtmiş bunu ITAB ve EM'nin sırasıyla takip ettiğini çalışmasında belirtmiştir. Okuroğulları [14], çalışmasında robotik gazaltı MAG kaynağını kullanarak S460mc ve St52 çeliklerinin kaynak uygulamalarını gerçekleştirmiştir. Bu çelikler üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, çekme dayanımına bakılırken ilerleme hızı, tel sürme hızı ve kaynak ark boyu parametrelerinin çalışmasında optimum oranlarda belirlenmesi gerektiğini belirtmiş aksi durumların çekme dayanımını olumsuz etkileyeceğini kaynaklı yapılar için uygun şartların elde edilemeyeceğini belirtmiştir. Şık [15], çalışmasında S355J2G3 yapı çeliğini kullanmıştır. Üç farklı karışım koruyucu gaz altında ve SG 2 tel elektrodunu kullanarak MIG/MAG kaynağını uygulamıştır. Karışım gazlar MAG kaynak tekniğine göre ayarlanmış %88-%10-%2, %80-%18-%2, %93-%5-%2 (Ar, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) koruyucu gazları olarak belirlemiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla sertlik deneyleri ve eğmeli yorulma deneylerini uygulamıştır. Sonuç olarak, %88 Ar + %10 CO<sub>2</sub> + %2 O<sub>2</sub> koruyucu gazının en yüksek mekanik özellikleri veren koruyucu gaz türü olduğunu belirlemiştir.

Robot ark ve punta kaynak türlerinden farklı olarak bu çalışmada kullanılan SPH440-OD çeliğinin yapısal çelik olmasından dolayı MAG kaynak uygulamasına uyumluluk sağlayacağı ve farklılık katacağı düşünüldüğünden 9 farklı tel hızı ve kaynak gerilimi parametre varyasyonlarında MAG kaynağı ile birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Çekme ve Vickers mikrosertlik deneyleri ile birleşimin mekanik davranışının deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir. EM, ITAB ve KM için ayrıca metalografi deneyi ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak haddelenmiş yapısal otomotiv çeliği olarak tanımlanan SPH440-OD çeliği ile yapılan bu deneysel inceleme çalışmasının, MAG gaz altı ark kaynağı uygulamalarına ve literatüre fayda sağlayacağı düşünülmektedir [16].

## 2. Malzeme ve Deneysel Çalışmalar (Material and Experimental Studies)

### 2.1. SPH440-OD çeliği ve kaynak işlemi (SPH440-OD steel and welding process)

Bu çalışmada, 3 mm kalınlıkta sıcak haddelenmiş SPH440-OD otomotiv sac çeliği kullanılmıştır. Ayrıca bu çelik SAPH440 tanımlaması ile de isimlendirilmektedir [3,4,17]. Nippon Steel Corp. [17], çelik üreticisinin çelik üretim kodu olan NSHA440B çeliği bu çalışmada kullanılan 3 mm kalınlığındaki SAPH440-SPH440-OD çeliğinin mekanik özellikleri ile aynı değerleri sunmasından dolayı Tablo 1

içerisine kimyasal bileşim verisi eklenmiştir. Ayrıca Ertürk ve Elitaş [18], çalışmasından elde edilen kimyasal bileşim verisi, SPH440-OD çeliğinin spektral analiz sonucuna göre oluşturulmuştur bu sebeple Tablo 1'e eklenmiştir. Bu çeliğe ait kimyasal bileşimler Tablo 1 içerisinde gösterilmiştir [3,4,17,18].

Tablo 1. SPH440-OD çeliğinin kimyasal bileşimleri (%) (Chemical compositions of SPH440-OD steel (%))

Çelik Sembolü JIS G3113	C Karbon	Si Silisyum	Mn Mangan	P Fosfor	S Kükürt	Cu Bakır	Ni Nikel	Al Alüminyum	Diğer	Fe Demir
SAPH440 [3]	≤ 0,21	≤ 0,30	≤ 1,50	≤ 0,025	≤ 0,025	-	-	-	≥ 0,010	Kalan
SAPH440 [4]	-	-	-	0,040 maks	0,040 maks	-	-	-	-	Kalan
SAPH440 [17]	≤ 0,15	≤ 0,80	≤ 1,90	≤ 0,025	≤ 0,010	-	-	-	-	Kalan
SPH440- OD [18]	0,15	0,01	0,70	0,013	0,007	0,026	0,022	0,02-0,05	-	Kalan

Kaynak işlemleri öncesinde uygun plaka ölçüsü elde edebilmek amacıyla Kaya [19], tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirlenen plaka ölçüleri ile 3 mm kalınlığında elde edilen sac malzemeler EHS 10-31 M giyotin kesme makinesi aracılığıyla 300x75 mm boyutlarına getirilerek 18 adet plaka elde edilmiştir.

En uygun tel hızı ve kaynak gerilimi parametrelerini belirlemek amacıyla giyotin kesme işlemi sonrası elde edilen hurda malzemeler üzerinde kaynak işlemleri yapıldı ve Tablo 2 içerisinde verilen elde edilmiş en uygun 9 farklı kaynak parametre varyasyonunda kaynak işlemleri gerçekleştirildi.

Tablo 2. Kaynak parametre değerleri (Welding parameter values)

Sac Plaka Kodları	Tel Hızı (m/dk)	Gerilim (V)
1A	5	15
1B	5	17
1C	5	19
2A	5,5	15
2B	5,5	17
2C	5,5	19
3A	6	15
3B	6	17
3C	6	19

Kaynak uygulamalarında GekaMak PowerPlus+ Plus MIG 250 PFC kaynak makinesi kullanılmıştır. Ayrıca tel elektrod malzemesi, Magmaweld MG 2 1,2 mm çaplı gaz altı (MAG) tel elektrottur. Alaşımız çeliklerin kaynak işlemlerinde kullanılan bir elektrod türüdür. Özsüz tel elektrod kullanımı olduğu için MG 2 teli aynı zamanda SG 2 teli olarak geçmektedir.

Bu tel elektrod türü alaşımız veya az alaşımız çelik malzemelerin kaynaklanmasında kullanılmaktadır [5].

HB 212 50 230, karışım gaz altı (MAG) koruyucu gazı olarak kullanılmıştır. Bu koruyucu gaz bileşim oranı olarak balans argon gazına ek olarak %2 O<sub>2</sub> ve %12 CO<sub>2</sub> gazı içermektedir [20]. Bu gaz türü hafif oksitleyici gaz grubunda yer alan alaşımız ve az alaşımız çeliklerin kaynak uygulamalarında kullanılmaktadır [21]. Tablo 3'de tel elektroda ait kimyasal bileşim verileri gösterilmiştir [5,22].

Tablo 3. SG 2/MG 2 elektroduna ait kimyasal bileşimler (%) (Chemical compositions of the SG 2/MG 2 electrode (%))

Tel Elektrod	C Karbon	Si Silisyum	Mn Mangan	≤ P Fosfor	≤ S Kükürt	Cu Bakır
SG 2 [5]	0,07-0,14	0,7-1,0	1,3-1,6	0,025	0,025	0,30
MG 2 [22]	0,07	0,90	1,45	-	-	-

Kaynak öncesinde 300x75 mm boyutlarında kesilmiş 18 adet plakaya çift V tipi 45° kaynak ağızı açılmıştır ve Tablo 2’de belirtilen kaynak parametre değerlerinde alın kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak masasına plakalar Şekil 1’deki gibi puntalanmıştır. Şekil 2’de örnek bir kaynaklı plakaya ait yatay görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 3’de ise dikey görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 1. Kaynak öncesi puntalanmış ve kaynak ağızı açılmış plakaların görüntüsü  
(Image of plates that have been centered and welding bent opened before welding)

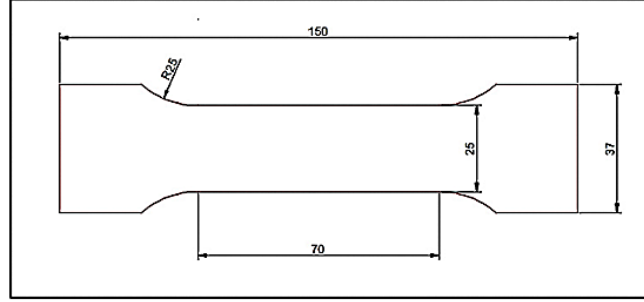


Şekil 2. Kaynak işlemi uygulanmış plakanın yatay görüntüsü (300 mm)  
(Horizontal view of the welded plate (300 mm))



Şekil 3. Kaynak işlemi uygulanmış plakanın yatay görüntüsü (150 mm)  
(Vertical view of the welded plate (150 mm))

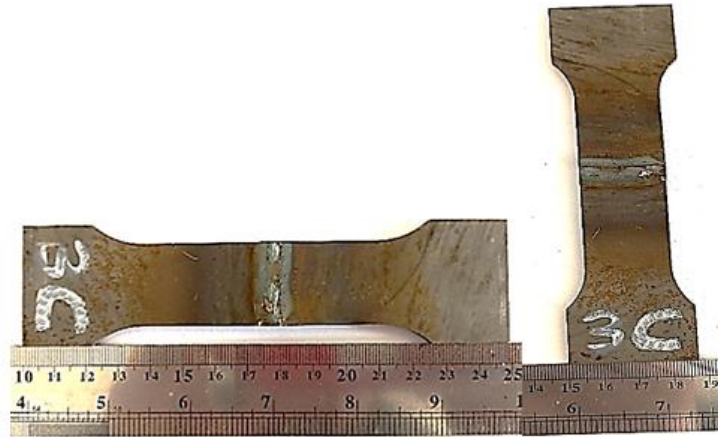
Kaynaklı 9 plaka malzemeden deneysel işlemlerde kullanmak amacıyla 27 adet çekme numunesi ve 9 adet mikroyapı ve mikrosertlik numuneleri tel erozyon kesimi ile elde edilmiştir. Tablo 2'deki sac plaka kodlandırması, tel erozyon işlemi öncesi varyasyonların karışmasını engellemek amacıyla tanımlanmıştır. Çekme numunelerine ait ölçüler ISO 4136 standardına göre ayarlanarak oluşturulmuştur [23]. Mikroyapı ve sertlik numuneleri için ölçü ise kaynak dikişini 2 cm ortalayacak şekilde EM, ITAB ve KM'yi inceleyebilmek amacıyla ayarlanmıştır. Şekil 4'de çekme numune ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Çekme numunesi ölçüleri (Tensile sample dimensions)

## 2.2. Çekme deneyi (Tensile test)

27 adet çekme numunesi için Shimadzu AG-IC marka çekme cihazında 2 mm/dk çene çekme hızında çekme deneyleri uygulanmıştır. Şekil 5'de örnek bir kaynaklı çekme numunesine ait yatay ve dikey görüntü gösterilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı çekme numunesi yatay ve dikey görüntüsü (150 mm ve 37 mm)  
(Horizontal and vertical view of welded tensile sample (150 mm and 37 mm))

## 2.3. Metalografi deneyi (Metallography test)

Tel erozyon kesimi ile elde edilmiş 9 numune içerisinde en simetrik dikiş görünümüne sahip olan 2B numunesi üzerinde EM, ITAB ve KM için mikroyapı görüntüsü alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunenin büyük kesilmesinden dolayı bakalite alma işlemi uygulanmamıştır. Görüntü alma işlemleri öncesinde sırasıyla 120-220-360-600-800-1200-1500-2000 numaralı zımparalama kağıtları kullanılarak her aşamada numuneyi 90 derece çevirerek zımparalama işlemleri tamamlanmıştır. Daha sonrasında yüzeye parlatma uygulaması kapsamında ise 3 mikron ve 1 mikron elmas pasta kullanılmıştır. Metkon Forcipol 2V zımparalama-parlatma cihazında zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Sonraki adımda ise %2 nitrik asit ve %98 metanol içeren %2 nital dağlayıcı çözeltisi ile yüzeye 2 sn aralıklarla dağlama uygulaması gerçekleştirilerek, numune optik mikroskopta görüntü almaya hazır hale getirilmiştir. Daha sonrasında Nikon Eclipse LV150 optik mikroskobunda EM, ITAB ve KM bölgeleri 40 µm ölçekte incelenmiştir.



#### 2.4. Vickers mikrosertlik deneyi (Vickers microhardness test)

Tel erozyon kesimi ile elde edilmiş 9 numunenin tamamının EM, ITAB ve KM bölgelerine Vickers sertlik deneyi uygulanmıştır. 2B numunesi dışındaki numunelere sadece zımparalama işlemi 120-220-360-600-800-1000 numaralı zımparalama kağıtları ile her aşamada numuneyi 90 derece çevirerek gerçekleştirilmiştir. EM, ITAB ve KM’de iz oluşumu elde edebilmek için diğer 8 numuneye zımparalama işlemi uygulanmıştır. Daha sonrasında numunelerin Vickers sertlik deneyleri Emcotest Durascan sertlik ölçme cihazı kullanılarak HV 0,5 yük ve 10 sn süre koşullarında uygulanmıştır. 20x odaklama ile iz görüntüleri incelenmiştir.

### 3. Deneysel İnceleme Sonuçları (Experimental Investigation Results)

#### 3.1. Çekme deneyi ve kaynak dikişi incelemeleri (Tensile test and weld seam investigations)

Çekme deneyi sonucunda Trapeziumx programı ile elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve yüzde uzama verileri Tablo 4’te gösterilmiştir. Tablo 4 içerisine ayrıca tel hızı ve kaynak gerilimi parametrelerinin çekme deneyi ve yüzde uzama sonuçlarına etkilerinin incelenmesi amacıyla Tablo 2’deki verilerde eklenmiştir. Ek olarak tablo içerisine SPH440-OD çeliğine (EM) ait çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri eklenerek sonuçlara göre tartışılmıştır.

Tablo 4. Tel hızı ve kaynak gerilimi değerlerinin etkisine göre elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve yüzde uzama verileri (Maximum tensile stress and percent elongation data obtained according to the effect of wire speed and welding voltage values)

Sac Plaka Kodları	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Yüzde Uzama (%)	Gruplar	Tel Hızı (m/dk)	Kaynak Gerilimi (V)
1A	506,71	20,67	1.Grup	5	15
1B	507,08	18,11		5	17
1C	509,08	20,59		5	19
2A	509,92	17,85	2.Grup	5,5	15
2B	510,00	21,64		5,5	17
2C	487,83	18,99		5,5	19
3A	508,83	20,44	3.Grup	6	15
3B	511,00	21,54		6	17
3C	515,83	20,72		6	19
EM [17]	440,00≤	t=3mm 32,00≤			

Tablo 4’e bakıldığında maksimum çekme gerilmesi değeri 515,83 MPa ile 3C plakasına ait çekme numunesinde görülürken en düşük değer 487,83 MPa ile 2C plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşmiştir. Maksimum yüzde uzama verilerinden en yüksek yüzde uzama değeri %21,64 ile 2B plakasına ait çekme numunesinde görülürken en düşük değer ise %17,85 ile 2A plakasına ait çekme numunesinde gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 4’teki sonuçlar tel hızının sabit tutulup, kaynak geriliminin kademeli artırılması kapsamında incelendiğinde, 1.grup ile 3.grupta çekme gerilmesinin arttığı görülmektedir. 2.grupta 2A’dan 2B’ye çekme geriliminde artış olsa bile 2C plakasında kaynak işleminde kaynak nüfuziyetinin yeteri kadar sağlanamaması çekme gerilimini olumsuz etkilemiştir ve çekme gerilmesinde düzenli artış görülmemiştir.

Tablo 4’teki sonuçlar kaynak geriliminin sabit tutulup, tel hızının kademeli olarak artırılması kapsamında incelendiğinde, 1A plakasından 2A plakasına doğru çekme numunelerinin çekme gerilmesi değerlerinde artış görülmüş aksine 3A plakası çekme numunesinin çekme gerilmesi değerinde ise çok az bir düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. 1B, 2B ve 3B plaka numunelerinde çekme gerilmesinde düzenli olarak artış görülürken, 1C, 2C ve 3C plakalarına ait çekme numunelerinde 2C’deki olumsuz durum burada da düzenli olarak çekme gerilmesinde artış olmasını engellemiştir.

Kılınçer ve Kahraman [24], tarafından gerçekleştirilen çalışma incelendiğinde, kaynak geriliminin sabit



tutulup, tel hızının kademeli olarak artırılması koşullarında gerçekleştirilen MIG kaynağı uygulamasında iki ayrı numunenin çekme deneyi sonuçlarında çekme mukavemeti değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Tablo 4 verileri bu koşullar çerçevesinde değerlendirildiğinde ise bu durumun genel anlamda bu çalışmada da elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4'te maksimum yüzde uzama verileri %17,85 ile %21,64 aralığındadır. 3 mm kalınlığında SPH440-OD çeliğinin (EM) yüzde uzama verisi  $32 \leq$  olarak belirtildiğinden dolayı, çekme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yüzde uzama verilerinin bu değerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun oluşma sebebi, EM sertliğinin ITAB-KM sertliğinden daha az olmasıdır. Kılınçer ve Kahraman [24], çalışmalarında bu durumun oluşma sebebini kaynaklı bölgede gerçekleşen sertlik artışı şeklinde belirtmişlerdir. Kaynak işlemleri esnasında kaynak akımının etkisine göre farklı ısı girdilerinin oluşması, çekme deneyi sonucunda elde edilen yüzde uzama değerlerinin farklı ve birbirine yakın seyretmesine sebep olmuştur. Kaya ve arkadaşları [25], çalışmalarında kaynaklı çekme numunelerinde yüzde uzama değerlerindeki farklılıkların belirtilen bu durumdan dolayı gerçekleştiğini düşünmüşlerdir.

Ayrıca Tablo 4'te EM'ye ait maksimum çekme gerilmesi değeri  $440 \leq$  MPa olarak gösterilmiştir. Kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında maksimum çekme gerilmesi değerlerinin EM çekme gerilmesi değerinden yüksek çıktığı görülmüştür.

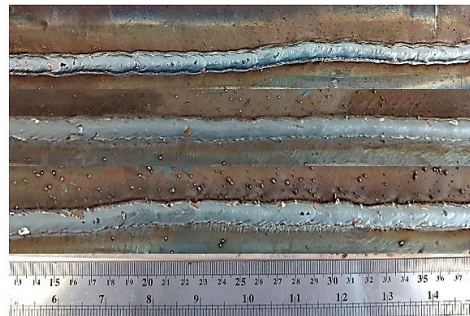
Şekil 6'da 1A, 1B ve 1C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir. Şekil 7'de 2A, 2B ve 2C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir. Şekil 8'de ise 3A, 3B ve 3C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 1A, 1B ve 1C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)  
(Weld seams of 1A, 1B and 1C welded plates (respectively))



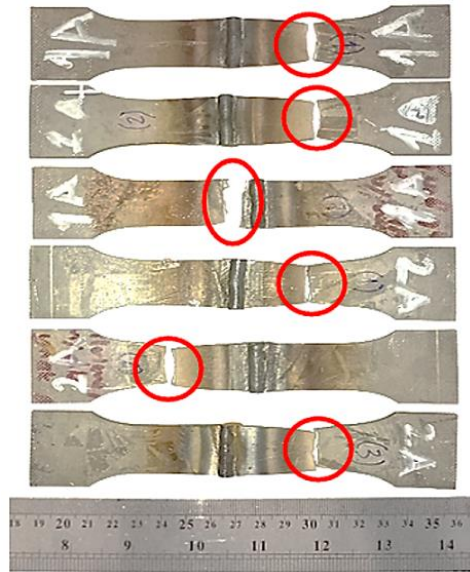
Şekil 7. 2A, 2B ve 2C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)  
(Weld seams of 2A, 2B and 2C welded plates (respectively))



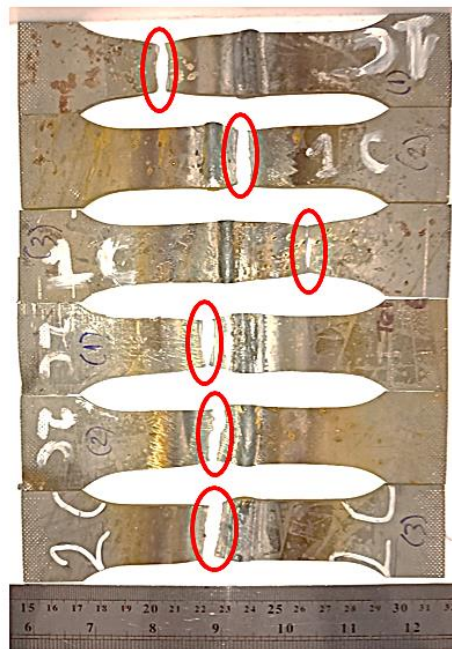
Şekil 8. 3A, 3B ve 3C kaynaklı plakalara ait kaynak dikişleri (sırasıyla)  
(Weld seams of 3A, 3B and 3C welded plates (respectively))

Şekil 6 ve Şekil 8 incelendiğinde kaynak dikişlerinde yukarıdan aşağıya doğru genişleme olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak geriliminin kademeli olarak artırılmasının kaynak dikişlerinin geniş ve yassı form almasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Kaynak geriliminin düşük olduğu ilk plaka dikişlerinde dar ve dış bükey formunda dikiş görünümleri olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7’de 2A’dan 2C’ye kaynak dikişinin genişlediği görülse bile kaynak esnasında kaynak nüfuziyetinin 2C plakasında sağlanamaması kaynak dikişinin kötü görünümüne sahip olmasına sebep olmuştur. Seçilen kaynak parametre değerlerinin uyumlu olması kaynak işleminde 2C plakasından farklı olarak diğer plakalarda kaynak dikişinin sürekliliğinde sorun olmamasını sağlamıştır.

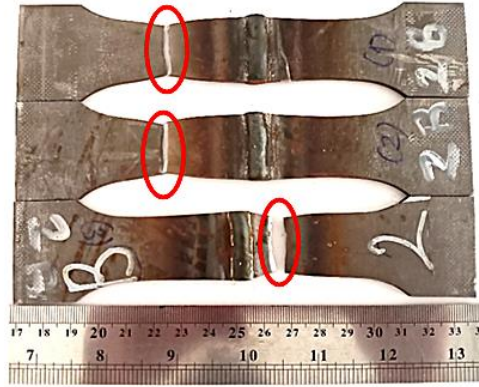
Şekil 9’da 1A ve 2A plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 10’da ise 1C ve 2C plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 11’de 2B plakasının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 12’de ise 3A, 3B, 3C ve 1B plakalarının çekme numunelerinin kopma bölgeleri gösterilmiştir.



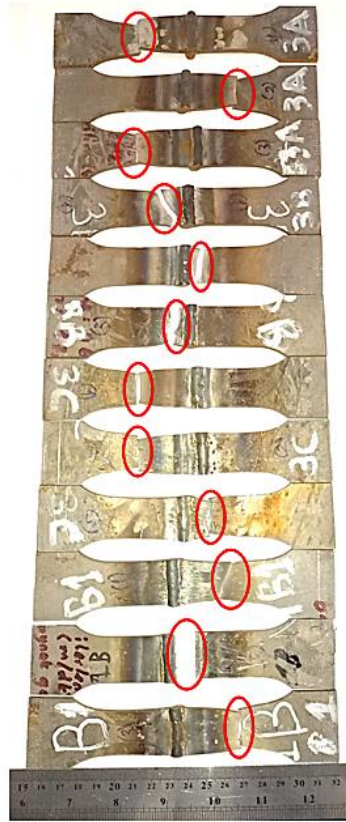
Şekil 9. 1A ve 2A plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri  
(Rupture zones of tensile samples of 1A and 2A plates)



Şekil 10. 1C ve 2C plakalarının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri  
(Rupture zones of tensile samples of 1C and 2C plates)



Şekil 11. 2B plakasının çekme numunelerine ait kopma bölgeleri  
(Rupture zones of tensile samples of 2B plate)



Şekil 12. 3A, 3B, 3C ve 1B plakalarının çekme numunelerinin kopma bölgeleri  
(Rupture zones of tensile samples of 3A, 3B, 3C and 1B plates)

Çekme numunelerinin tümü incelendiğinde 17 çekme numunesinde EM'de kopmalar görülürken 10 çekme numunesinde ITAB'da kopmalar olduğu gözlemlenmiştir. 3B ve 2C plakalarının tümünde ITAB'da kopmalar meydana gelmiştir. Genel anlamda EM'de kopmaların oluştuğu gözlemlenebilmektedir.

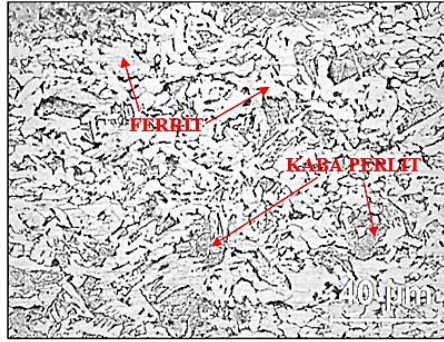
ITAB'daki kopma sebepleri incelendiğinde, bu bölgede kaynak esnasında hızlı ısınma durumu oluşmaktadır ve uygulanan enerji, malzeme kalınlığı ve ön tavlama sıcaklığı gibi etmenler de hızlı soğumayı etkilemektedir. Soğuma hızı, 900 °C'nin üstündeki bölgelerde kritik soğuma hızını aştığında sert ve kırılgan yapılar oluşabilmektedir [26]. Çekme deneyi sonucunda ITAB'daki kopma sebeplerinden bir tanesi bu şekilde gerçekleşmektedir. Diğer sebep ise uygun kaynak nüfuziyetinin sağlanamamasıdır. 2C plakası numunelerindeki ITAB'da oluşan kopma durumlarına bu durumun da etki ettiği düşünülmektedir.

### 3.2. Metalografi deneyi sonuçları (Metallography test results)

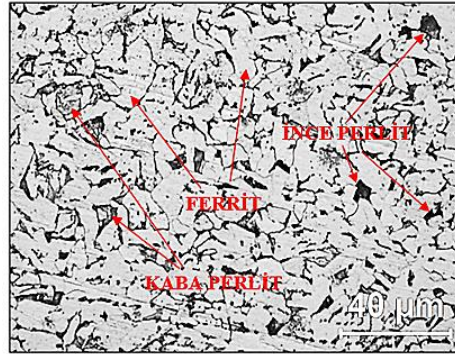
2B numunesi için EM, ITAB ve KM bölgeleri için elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 13,



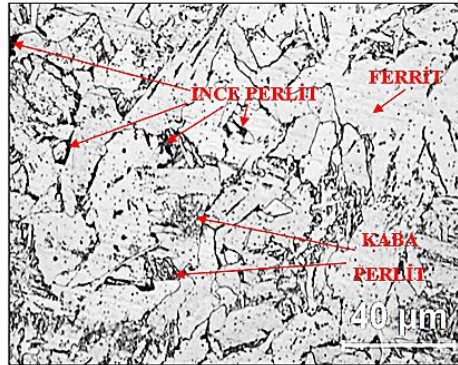
Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 13. EM'nin mikroyapı görüntüsü  
(Microstructure image of BM)



Şekil 14. ITAB'ın mikroyapı görüntüsü  
(Microstructure image of HAZ)



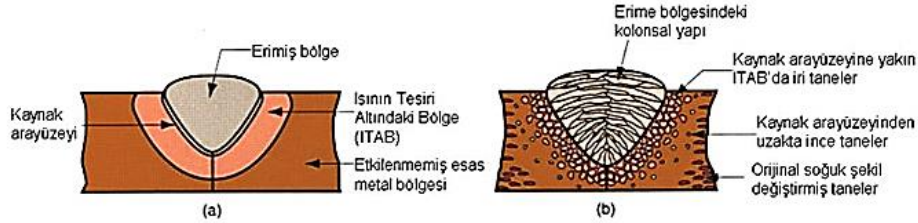
Şekil 15. KM'nin mikroyapı görüntüsü  
(Microstructure image of WM)

Mikroyapı görüntülerine bakıldığında Şekil 13'te EM'de ferrit+kaba perlit faz yapı oluşumlarının olduğu görülmüştür. Şekil 14'te ise bu faz yapılarına ek olarak daha koyu görünümde ince perlit fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 15'te ise Şekil 14'teki gibi benzer faz oluşumlarına rastlanmıştır. Genel anlamda EM'ye göre ITAB'da tanelerin yoğunlaştığı ve irileştiği, KM'de ise tanelerin büyüdüğü görülmektedir.

Faz yapılarının yapıya etkileri incelendiğinde, ferrit fazının çözebildiği karbon oranının düşük olması bu fazın sertliğinin de az olmasına sebep olmaktadır. Bu faz yapısı malzemelerin sünek ve işlenmeye uygun olmasını sağlar aynı zamanda bu yapı manyetik özellik göstermektedir [27]. Perlit fazı sementit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Sementit fazı sert ve gevrek bir fazdır. Malzemenin yapısında sementit oranının artması malzemenin sertliğini ve dayanıklılığını artırırken buna karşın sünekliğini ve tokluğunu da azaltır. Perlit fazı iki farklı türden oluşmaktadır. İnce perlitte, ferrit ve sementit fazları nispeten ince ve tekrarlı tabaka oluşumları ile faz düzenine sahip olurken, kaba perlitte daha sert ve dayanıklı bir fazdır fakat daha az sünektir. Kaba perlitte, nispeten kalın ve tekrarlı tabaka oluşumları ile faz düzeni oluşumu görülür bu fazın ince perlit fazına göre sünekliği ve tokluğu daha yüksektir [28]. EM, ITAB ve KM mikroyapı incelemelerinde görülen bu faz yapıları, kaynaklı yapıların mekanik

özelliklerini yukarıda belirtilen özellikleri kapsamında etkilemektedir.

Şekil 16'da MAG kaynak uygulamasında rastlanan, EM, ITAB ve KM bölgelerine ait tane oluşumları şematik olarak gösterilmiştir.

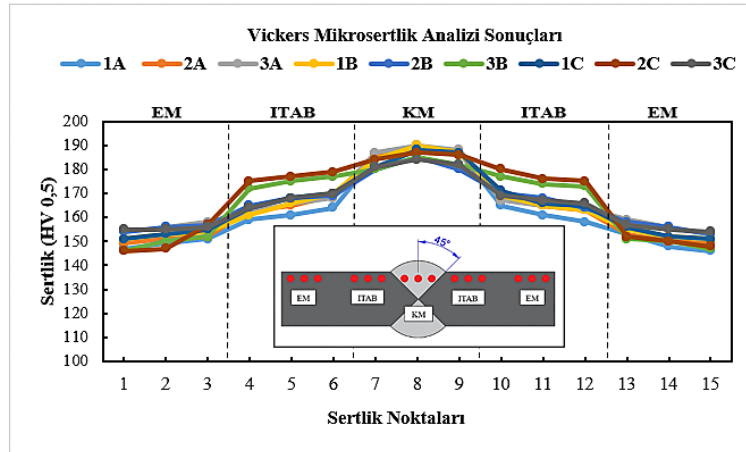


Şekil 16. EM, ITAB ve KM'ye ait şematik tane oluşumları [29]  
(Schematic image of grain formations of BM, HAZ and WM)

Şekillerle belirtilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında, EM'ye göre ITAB'da tane yapılarının büyüdüğü ve sıklaştığı, KM'de ise tanelerde kolonsal yapıda irileşme olduğu görülmüştür. Şekil 16'ya göre bu durum desteklenmiştir.

### 3.3. Vickers mikrosertlik deneyi sonuçları (Vickers microhardness test results)

Şekil 17'de Vickers mikrosertlik deneyi analiz sonuçları ve kaynak dikişine ait şematik görsel üzerinde sertlik noktaları bölgesel olarak şekilde gösterilmiştir. Tablo 5'te ise bölgelere göre sertlik noktalarına ait olan verilerin ortalamaları alınarak oluşturulmuş HV sertlik verileri sunulmuştur.



Şekil 17. EM, ITAB, KM bölgelerinin mikrosertlik analiz sonuçları ve kaynak dikişine sertlik noktaları  
(Microhardness analysis results and weld seam hardness points of BM, HAZ, WM regions)

Tablo 5. EM, ITAB, KM bölgelerinin ortalama mikrosertlik analiz verileri (Average microhardness analysis data of BM, HAZ, WM regions)

Numuneler	EM ORT	ITAB ORT	KM ORT
1A	149,00	161,33	186,67
2A	150,67	165,67	187,00
3A	156,00	165,33	188,33
1B	152,67	165,67	187,00
2B	155,67	167,33	181,67
3B	149,33	174,67	182,33
1C	153,00	167,33	185,33
2C	150,00	177,00	185,67
3C	155,33	167,33	182,33

Şekil 17 ve Tablo 5'e göre sonuçlar incelendiğinde bölge bazlı EM'den ITAB'a, ITAB'dan KM'ye doğru sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Kaya [19], çalışmasında yapı çeliklerinin MAG kaynak türünde birleştirilebilirliğini incelemiş ve sertlik değerlerinin bölge bazlı EM'den ITAB'a, ITAB'dan KM'ye doğru artış gösterdiğini belirtmiştir. Bu çalışmada ise bu durumun desteklendiği görülmektedir.

Tüm plaka numunelerinde sertlik aralıkları, EM'de 146-159 HV ölçülmüştür. ITAB'da, 158-180 HV ölçülürken, KM'de ise, 180-190 HV sertlik değer aralıkları elde edilmiştir.

2C ve 3B plakalarına ait numunelerin tümünde çekme deneyi sonucunda ITAB'da kopmalar meydana geldiğinden mikrosertlik deneyi sonuç verileri arasındaki ilişki incelendiğinde, 2C ve 3B plaka numunelerinin ITAB sertliklerinin diğer numunelerin ITAB sertlik değerlerinden daha fazla çıktığı görülmüştür ve numunelerde kopmaların bu sebeple gerçekleştiği düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 17 incelendiğinde, tüm plaka numunelerinin sertlik değerlerinin nokta bazlı EM ve KM'de birbirine yakın değerler gösterdiği görülmektedir. ITAB'da kaynaklı birleşimler için çatlama ve kopma durumları incelendiğinde kritik bir bölge olmasından dolayı sertlik değerleri eğrisel olarak daha farklı sonuçlar göstermiştir. Kılınçer ve Kahraman [24], çalışmalarında çatlama ve kopmaların kaynaklı birleşimlerde ITAB'da gerçekleştiğini desteklemiştir.

Mikroyapı incelemesi sonucunda ince perlit fazının KM ve ITAB bölgelerinde gözükmesi sertliğin bu bölgelerde artış göstereceği sonucunu ortaya çıkarmıştır. 2B mikroyapı numunesine ait elde edilen sertlik değerlerinin KM ve ITAB'da yüksek olması bu durumu desteklemiştir.

Aynı zamanda ITAB ve KM'nin, EM'ye göre daha yüksek sertliğe sahip olması, kaynak uygulamasında ısı girdisinin etkisine göre kaynak işlemi sonrasında farklı soğuma hızlarından ortaya çıkmıştır. Kaya [19], çalışmasında bu durumu yaptığı mikrosertlik testi sonuçlarında desteklemiştir.

Çekme deneyi sonucu numuneler için elde edilen maksimum yüzde uzama verilerinin, bu çalışmada kullanılan 3 mm kalınlığındaki SPH440-OD çeliğinin yüzde uzama verisinden daha düşük geldiği bu durumun sebebinin ise, EM sertliğinin ITAB-KM sertliğinden daha az olması şeklinde daha öncesinde açıklanmıştır. Genel olarak, sertlik deneyi sonuçlarına göre EM sertliğinin, ITAB ve KM sertliklerinden daha az geldiği veriler ışığında gözlemlenmektedir. Vickers mikrosertlik deney sonuçları belirtilen argümanın desteklenmesini sağlamıştır.

#### 4. Sonuçlar (Results)

Bu deneysel inceleme çalışmasında, 3 mm kalınlığında SPH440-OD sıcak haddelenmiş yapısal otomotiv çeliğine, 9 farklı tel hızı-kaynak gerilimi parametre değerlerinde gazaltı ark kaynağı yöntemi olan MAG kaynağı birleştirme işlemi uygulanmıştır. Kaynak işlemi uygulanmış plakalardan deney numuneleri elde edilmiş ve bu numunelere çekme deneyi, metalografi deneyi ve Vickers mikrosertlik deneyleri uygulanmıştır. Birleşimlerin kaynak dikişleri, mikroyapı ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

- Çekme deneyleri sonuçlarına göre, en yüksek çekme gerilmesi 3C plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşirken, en düşük çekme gerilmesi ise 2C plakasına ait çekme numunesinde olduğu görülmüştür.
- Çekme deneyleri sonuçlarına göre, en yüksek yüzde uzama 2B plakasına ait çekme numunesinde gerçekleşirken, en düşük yüzde uzama ise 2A plakasına ait çekme numunesinde olduğu görülmüştür.
- Tel hızı ve kaynak geriliminin çekme deneyi sonuçları ile ilişkisi incelendiğinde, genel anlamda ayarlanan gruplar arasında çekme gerilmesinde artışın olduğu görülürken, 2C plakasına ait gruplamalarda kaynak nüfuziyetindeki sorundan dolayı çekme gerilmesinde düşme gözlemlenmiştir.
- ITAB-KM sertliğinin EM sertliğinden yüksek olması, çekme deneyleri ile elde edilen yüzde uzama verilerinin kullanılan çelik malzemenin yüzde uzama verisinden düşük gelmesine sebep olmuştur. Vickers mikrosertlik deney sonuçlarına göre de bu durum sayısal anlamda desteklenmiştir.
- Tel hızının sabit tutulması ve kaynak geriliminin kademeli artırılması genel anlamda kaynaklı plakaların kaynak dikişlerinin geniş dikiş formu almasına neden olmuştur.
- Çekme deneylerinde numunelerde kopma bölgelerine bakıldığında genel olarak EM'de kopmaların olduğu görülmüştür.
- Çekme deneyi sonucunda ITAB'da kopma durumlarının hızlı ısınma ve soğumaya bağlı oluşan sert ve kırılğan yapılardan ve kaynak nüfuziyetsizliği durumlarından dolayı gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.
- Metalografi deneyi sonucuna göre bölge bazlı elde edilen faz yapılarının, EM, ITAB ve KM sertliğini etkilediği sonucuna varılmıştır. Vickers sertlik deneyi ile bu sonuç desteklenmiştir.



- EM'ye göre ITAB'da tane oluşumlarının büyüdüğü ve sıklaştığı, KM'de ise tanelerde kolonsal yapıda irileşme olduğu sonucuna varılmıştır.
- Numuneler arasında genel anlamda sertliğin EM'den ITAB'a, ITAB'dan KM'ye doğru arttığı görülmüştür.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışmada, kullanılan çeliğin temininde yardımcı olan Ahmet GÜVE'ye, kaynak işlemleri için tüm imkanlarını sunan ERÇAĞ VİNÇ firması yöneticileri ve çalışanlarına teşekkürlerimizi sunuyoruz.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] MST Steel Corp., "TSG3100G Toyota Hot Rolled JIS Steel," [Online]. Available: <http://steel-coils-sheets.mststeel.com/item/japanese-industrial-standards-jis-hot-rolled-steel/tsg3100g-toyota-hot-rolled-jis-steel/sph440>. [Accessed: Apr. 14, 2024].
- [2] F. Aliandi, A. Muchlis and S. Suryady, "Manufacturing process and tonase calculation on bumper rear axle bracket rh," *International Journal of Science, Technology & Management*, pp. 1070-1079, 2021.
- [3] BBN Steel Co.,Ltd, "JIS G3113 SAPH440 Chemical & Mechanical Composition," [Online]. Available: [http://www.bbnsteelplate.com/news/jis-g3113-saph440-chemical-mechanical-composition\\_933.html](http://www.bbnsteelplate.com/news/jis-g3113-saph440-chemical-mechanical-composition_933.html). [Accessed: Apr. 14, 2024].
- [4] "Hot Rolled Steel Sheet," [Online]. Available: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/sheets/catalog/b1e-001.pdf>. [Accessed: May 3, 2024].
- [5] N. Kahraman and B. Gülenç, *Modern kaynak teknolojisi ve kaynak işlerinde iş sağlığı ve güvenliği: MIG-MAG kaynağı*, Genişletilmiş 4. baskı. Ankara: Epa-Mat Basım Yayın Ltd, Şti. 2020, pp. 102-142.
- [6] K. Weman and G. Linden, *MIG welding guide: The MIG welding process*. USA, CRC Press, 2006, pp. 3-29.
- [7] "MIG-MAG Kaynağı," [Online]. Available: <https://www.eurobotik.com/mig-mag-kaynagi/#:~:text=MIG%20%2F%20MAG%20kaynak%20i%20%20%20Flemeleri%20%20%20C3%A7ok,farkl%C4%B1%20malzemelerden%20yap%C4%B1m%C4%B1%20%20%20%20bile%20%20%20Fenlerle%20kullan%C4%B1labilir>. [Accessed: Apr. 17, 2024].
- [8] R. Erol, "Gaz altı ark kaynağı yönteminde proses parametrelerinin yapıdaki çarpılmaya etkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye, 2017.
- [9] A. A. T. Okuyan and H. Uzun, "Boru ile lamanın robot ark kaynak tekniğiyle birleştirilmesinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 297-307, 2017.
- [10] T. P. Kasih, A. Kharisma and A. Suryanto, "Optimization of spot welding process parameters on dissimilar and unequal thickness of metal sheets by using Taguchi technique," *The 2nd International Conference on Eco Engineering Development 2018 (ICEED 2018)*, 2018, pp. 1-6. doi:10.1088/1755-1315/195/1/012036
- [11] Y. Gür, "MIG/MAG kaynağı ile birleştirilen S700 MC yüksek dayanımlı yapı çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2022.
- [12] A. O. Işık, "MAG kaynağında özlü tel Elektrod tipinin kaynak dikişi özelliklerine etkisinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul, Türkiye, 2014.
- [13] B. Eleman, "Yeni nesil (invertör) ve geleneksel MIG / MAG kaynak makinaları ile kaynaklanan S355 kalite çeliğin kaynak dikişlerinin makro yapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması," Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
- [14] Y. Okuroğulları, "Gazaltı kaynağı ile birleştirilen farklı özellikteki çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2022.
- [15] A. Şık, "MIG/MAG kaynağı ile kaynatılan çelik yapılarda koruyucu gaz karışımlarının mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması," *Trakya Univ J Sci*, vol. 8, no. 1, pp. 55-60, 2007.
- [16] M. B. Kaya, "MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen SPH440-OD çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye, 2024.
- [17] Nippon Steel Corp., "Hot-Rolled Steel Sheets and Coils," [Online]. Available: [https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/U001en.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/U001en.pdf). [Accessed: May 03, 2024].

- [18] Ç. Ertürk and M. Elitaş, "MAG gazaltı kaynağı ile birleştirilen otomotiv çeliklerinin (SPH270-C/SPH440-OD) çekme özelliklerinin ve kaynak dikişinin incelenmesi," *2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 2024. pp. 398-402.
- [19] Y. Kaya, "S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması," *Politeknik Dergisi*, vol. 21, no. 3, pp. 597-602, 2018. doi:10.2339/politeknik.375183
- [20] "HB212 Karışım Gazı," [Online]. Available: <https://www.elkagaz.com.tr/hb212-karisim-gazi-nedir>. [Accessed: May 03, 2024].
- [21] K. Tülbentçi, *MIG-MAG eriyen elektrod ile gazaltı kaynağı: MIG-MAG kaynak donanımı*, İstanbul, Gedik Eğitim Vakfı, 1990, pp. 1-27.
- [22] "MG 2," [Online]. Available: <https://www.magmaweld.com.tr/mg-2-uo>. [Accessed: May 03, 2024].
- [23] "ISO 4136'ya Göre Saclar ve Yassı Mamuller İçin Hazırlanan Kaynaklı Çekme Numunesi Şekli ve Ölçüleri," [Online]. Available: <https://www.mazlumboru.com.tr/upload/2017/03/kaynakli-cekme-test-numunesi-iso-4136.pdf>. [Accessed: May 04, 2024].
- [24] S. Kılınçer and N. Kahraman, "AISI 409 ve Ç1010 çeliğın östenitik elektrod kullanarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması," *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 24, no. 1, pp. 23-31, 2009.
- [25] Y. Kaya, G. Çayırhan, M. Bökü and N. Kahraman, "Paslanmaz Çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerin MIG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin incelenmesi," *Engineering Sciences (NWSAENS)*, *1A0453*, vol. 15, no. 2, pp. 89-99, 2020. doi:10.12739/NWSA.2020.15.2.1A0453
- [26] İ. Ertürk, T. Durukan and B. Şentürk, "Çeliklerin kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin mikro yapı ve özelliklerinin tahmini," *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 2017. pp. 1-14.
- [27] "Ferrit, Östenit ve Sementit," [Online]. Available: <https://www.maktoloji.com/2018/12/ferrit-ostenit-ve-sementit.html>. [Accessed: May 19, 2024].
- [28] "Faz Dönüşümleri," [Online]. Available: <https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/duyurular/yusufkanca@hititedutr211220180X7J9S0V.pdf>. [Accessed: May 19, 2024].
- [29] "Ergitme ve Katı Hal Kaynak Bölgesi Arasındaki Farklar," [Online]. Available: <https://xn--natralist-s9a.com/ergitme-ve-kati-hal-kaynak-bolgesi-arasindaki-farklar/> [Accessed: May 20, 2024].

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Voronoi Latticed Bike Saddle Design Optimization with Data-Driven Design Technique

Ahmet Dayanc<sup>a</sup>, Melih Canlidinc<sup>b</sup>, Feridun Karakoc<sup>c</sup>

Submitted: 23.07.2024 Revised: 03.09.2024 Accepted: 02.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR07

### ABSTRACT

**Keywords:** Data-Driven Design, Design Optimization, Lattice Structures, Lightweighting, nTopology

<sup>a,\*</sup> Kutahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Dept. of Mechanical Engineering 43100 - Kutahya, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-5214-9021  
e mail: ahmet.dayanc@dpu.edu.tr

<sup>b</sup> Kutahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Dept. of Mechanical Engineering 43100 - Kutahya, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-4011-9490

<sup>c</sup> Kutahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Dept. of Mechanical Engineering 43100 - Kutahya, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-6210-4070

\*Corresponding author:  
ahmet.dayanc@dpu.edu.tr

The study presents an innovative methodology using implicit modeling to optimize the design of racing bicycle saddles, focusing on weight reduction while maintaining structural integrity. Implicit modeling addresses the limitations of traditional CAD modeling by defining geometries through mathematical functions, enabling smaller file sizes and more effective analyses for complex models. The research utilized nTopology software to convert a CAD model of a bicycle seat into an implicit model, followed by structural analysis and optimization of a Voronoi lattice structure within the seat. This approach resulted in a significant weight reduction of 50.65%, decreasing the seat's weight from 130.61 grams to 64.45 grams. The maximum elastic displacement measured was 1.65 mm, with the maximum Von Mises stress value observed at approximately 15 MPa, indicating the design's capability to withstand loads. The study concludes that the use of implicit modeling offers substantial advantages in industrial design, particularly in sectors where weight reduction is critical, such as aerospace and automotive. Future research should focus on further developing implicit modeling techniques and exploring their applications in various industrial contexts.

## Veri Odaklı Tasarım Tekniği ile Voronoi Kafesli Bisiklet Selesi Tasarım Optimizasyonu

### ÖZ

Çalışmada, yarış bisiklet selesinin tasarımını optimize etmek için ağırlık azaltma ve yapısal bütünlüğü koruma odaklı örtük modelleme kullanılarak yenilikçi bir metodoloji sunulmaktadır. Örtük modelleme, geometrileri matematiksel fonksiyonlar aracılığıyla tanımlayarak, daha küçük dosya boyutları ve karmaşık modeller için daha etkili analizler yapılmasını sağlayarak geleneksel CAD modellemenin sınırlamalarını gidermektedir. Araştırmada, nTopology yazılımı kullanılarak bisiklet selesinin CAD modeli örtük modele dönüştürülmüş, ardından yapısal analiz ve sele içerisindeki Voronoi kafes yapısının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, sele ağırlığının 130,61 gramdan 64,45 grama düşürülmesiyle %50,65'lik önemli bir ağırlık azalması sağlamıştır. Maksimum elastik yer değiştirme 1,65 mm olarak ölçülmüş, maksimum Von Mises gerilme değeri yaklaşık 15 MPa olarak gözlemlenmiş ve bu tasarımın dinamik yüklere dayanma yeteneğini göstermiştir. Çalışma, örtük modellemenin özellikle havacılık ve otomotiv gibi ağırlık azaltmanın kritik olduğu sektörlerde endüstriyel tasarımda önemli avantajlar sunduğunu sonucuna varmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, örtük modelleme tekniklerinin daha da geliştirilmesine ve çeşitli endüstriyel bağlamlarda uygulamalarının araştırılmasına odaklanmalıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Veri Odaklı Tasarım, Tasarım Optimizasyonu, Kafes Yapılar, Hafifletme, nTopology

## 1. Introduction

As an innovative design technology, "Implicit Modeling" addresses the shortcomings of the "Boundary Representation" method used by CAD programs [1]. In CAD modeling, 2D sketches are created on a sketch plane, and 3D volumes are generated from them. Even in a simple cube, which is not complex, there are multiple faces, edges, and vertices. As the complexity of the shape increases, the number of these elements also increases. For example, in a unit cell named "Body Centered Cubic," the number of CAD elements can reach up to 42. However, when we aim to create a more complex lattice structure composed of multiple unit cells and periodically replicate this unit cell across three axes in a CAD model, the number of elements and data sizes increase drastically. At a certain point, CAD software may become unable to open these files, or working with them might become impossible. Additionally, since these periodically replicated unit cells have fixed dimensions, it may become impossible to manually optimize the regions where stress is concentrated on a part formed by the lattice structure. At this point, unlike CAD modeling, the same volume can be defined by a mathematical equation through implicit modeling, and the 3D geometry can be rendered as the exact same shape. In this case, implicit data can be stored in very small file sizes, and if the inputs to this mathematical expression change, the geometry generated as the function's output can also be modified. One of the advantages of implicit modeling is that it enables data-driven design. Since implicit geometry in areas with high stress is data-driven, it can automatically adjust to optimal dimensions if the appropriate input is provided. An example of this method is the adjustment of the distances between voids in a Voronoi lattice and the thicknesses of its struts in such a way that they are variable and optimal according to the stress concentration regions on the part. There are also other significant studies in the literature concerning lattice structures. In some studies, the mechanical properties of parts made of PLA (Polylactic Acid) material produced with different lattice geometries and porosity ratios, as well as the tribological properties of samples made of ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate) material produced with different infill densities, have been compared. It has been found that PLA samples with Octet infill geometry have the highest tensile strength, while Cross infill geometry shows the most deformation [2]. In the ASA material samples, it was determined that those with 90% infill density offered higher hardness values and lower wear rates compared to others [3]. Both studies have demonstrated that parameters such as infill density and geometry are crucial in determining the mechanical and tribological performance of materials. By using topology-optimized parts or complex internal lightweight lattice designs, which are significant advantages of additive manufacturing, current optimization targets such as minimizing material and energy costs can be achieved [4]. The application of these techniques is critically important for sectors like aerospace, medical, and defense, enabling our country to produce competitive projects on an international scale with indigenous and national resources [5].

For instance, recent studies have demonstrated that functionally graded lattice structures (FGLSs) can significantly enhance mechanical properties and energy absorption, particularly when optimized for specific applications, such as in the aerospace and biomedical fields [6]. Furthermore, the design and optimization of gradient lattice structures using advanced CAD techniques have been shown to yield components with improved structural performance and weight efficiency, which are crucial in high-stress environments [7].

Moreover, recent advancements in additive manufacturing, particularly in functionally graded additive manufacturing (FGAM), have highlighted the potential of these methods to create highly customized and optimized lattice structures, providing superior mechanical properties while maintaining lightweight characteristics [8].

One of the main disadvantages of CAD design is that the initial design created by the design engineer is far from the desired objectives, i.e., it is not optimized. The optimization process requires experienced engineers to work on dozens of designs by changing various parameters, resulting in time loss and extra effort, and it is a process that can also be prone to local weaknesses and errors. The implicit modeling technology to be used can create optimal designs where weaknesses are addressed by using field-driven design and data-driven design techniques, analyzing resulting data fields, and using special algorithms.

Recent advancements in the field have also proposed the integration of manufacturing constraints into topology optimization processes, which can significantly enhance the manufacturability of complex

geometries produced through additive manufacturing. This approach not only optimizes structural performance but also ensures that the designs are practical for real-world manufacturing applications, thus providing a more comprehensive solution for the challenges faced in traditional methods [9].

The modeling technique to be used in this study provides a solution to the bottlenecks that will be experienced due to the number of elements in complex lattice structures and indirectly the resulting sizes if designed as a CAD model [10]. As an alternative to periodic lattice structures, the data-driven technique offers the possibility to create the most optimal and extraordinary designs with gradient variations in thickness and variable spatial gaps based on data, representing the most advanced and unique value in the construction field today [11]. Recent studies have also shown that the material properties of functionally graded lattice structures can be fine-tuned to achieve specific mechanical behaviors, making them suitable for a wide range of industrial applications, especially where weight reduction and mechanical efficiency are crucial [12]. This study will gain the ability to create strong lattice structures that can safely operate within certain boundary conditions where high-level lightness is desired and using this method for redesigning currently used parts in our strategic sectors will pave the way for establishing university-industry collaborations with institutions like TEI, which is of critical importance [13].

## 2. Method

This study describes a methodology that can be used to lighten a racing bicycle seat by leveraging the advantages of implicit modeling using nTopology software. This methodology initially requires a CAD model as input. Final design modifications to the reference CAD model were completed using SOLIDWORKS software. The reference CAD model in the study is an assembly file of the bicycle seat itself and its lower supports and was imported into the software with the "Import Part" function block. The internal and external edge features in the CAD model of the bicycle seat were defined as variables to be used as inputs in other functions at intermediate stages of the methodology. Figure 1 below shows the CAD model of the bicycle seat and its lower supports from different angles and an isometric view of the edges defined as variables.

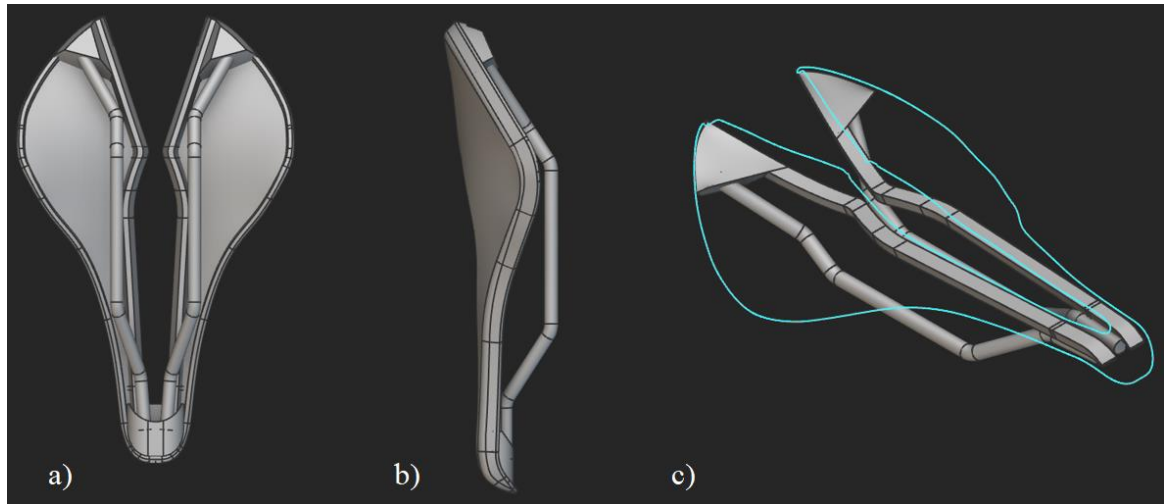


Figure 1. Reference CAD Model and Support Structures in Various Perspectives (a,b and c)

Various function blocks belonging to the nTopology software accept different data types as input. However, some functions used to optimize the CAD model require implicit data as input. For this reason, the CAD data type imported into the software was converted to the implicit data type with the "Implicit Body from CAD Body" function block. Figure 2a below shows an image of the implicit volume that does not contain the elements of the CAD modeling method using the "Boundary representation" method. To perform data-based optimization on the Voronoi lattice structure used in lightening the seat, the data obtained from the structural analysis of the seat should be used [14]. To create the mesh required for structural analysis, several intermediate processes were completed. In this process, a mesh was obtained from the implicit body. The mesh created with the "Mesh from Implicit Body" function block was used as input in the "Remesh Surface" block to create a surface mesh suitable for structural analysis, and a new mesh structure was obtained as an output of this function by adjusting the relevant parameters. Different mesh parameters affect mesh metrics such as skewness and



orthogonality, so different parameters should be used for different geometries. Figure 2b below shows the new surface mesh created for structural analysis. Figure 2c shows the use of the surface mesh arranged as input for a function that can create a volume mesh, and to generate compatible volume mesh elements, the edge length parameter of the volume mesh elements was taken equivalent to the edge length parameter of the surface mesh elements [15]. After creating the volume mesh, nodes were assigned to obtain a finite element volume mesh suitable for structural analysis.

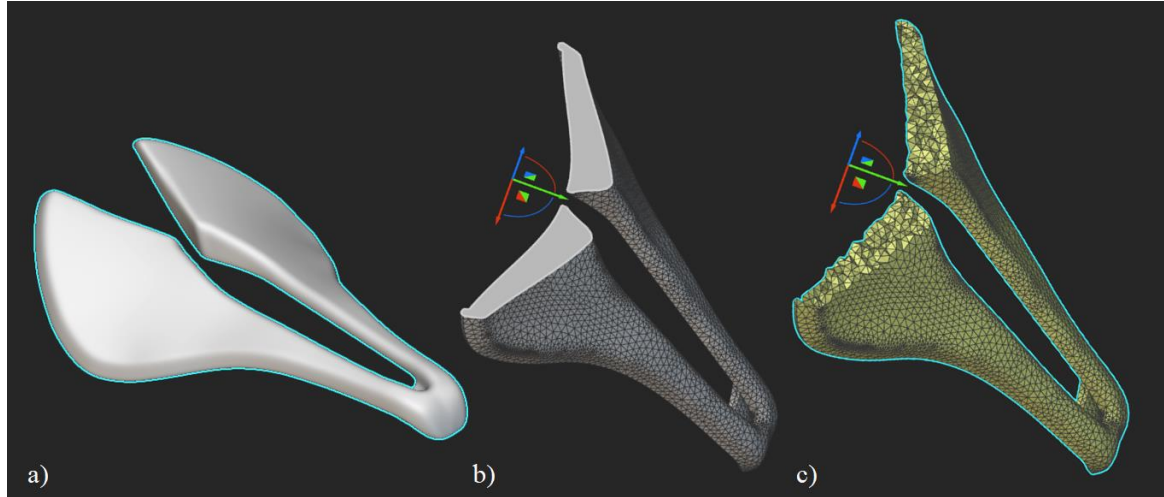


Figure 2. a) Implicit Body b) Surface Mesh c) FE Volume Mesh

Another element necessary for structural analysis is the definition of boundary conditions. In this study, when the right and left regions of the seat model are considered together, a distributed force of 250 N in the -Z axis was applied to two circular areas, each approximately 30 mm in diameter. The applied forces are represented by yellow arrows in Figure 3a. In Figure 3b, the fixed faces defined by restricting translational and rotational movements are represented by red cones. The locations of the cones and arrows correspond to the positions of the nodes on the mesh.

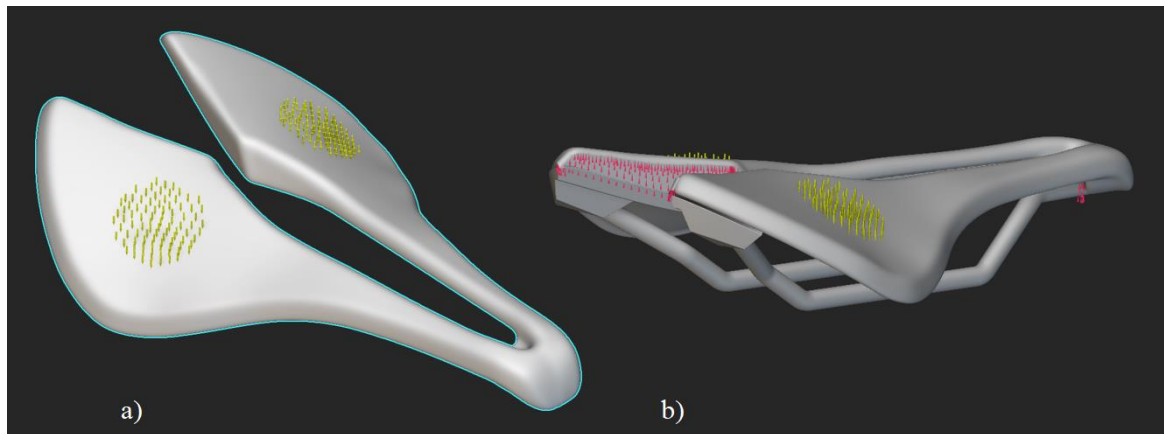


Figure 3. a) Applied Forces b) Fixed Faces

Figure 4a below shows the gradient color change from blue to red, representing the maximum displacement. Considering the defined Polyamide PA2200 material and other boundary conditions, the amount of elastic displacement increases as we move away from the fixed faces with the support structure. The mesh frame visualized here, which contains a relatively small number of mesh elements, was not used in the static analysis. This mesh frame, with 13,710 nodes and 57,217 mesh elements, was used to obtain the point map necessary for generating the optimized Voronoi lattice. Figure 4b below shows the point map exported as an output of the structural analysis function. As a result of identifying the displacements and completing the intermediate processes where the obtained point map is used as input in different functions, an implicit field to be used for developing the Voronoi lattice was derived.

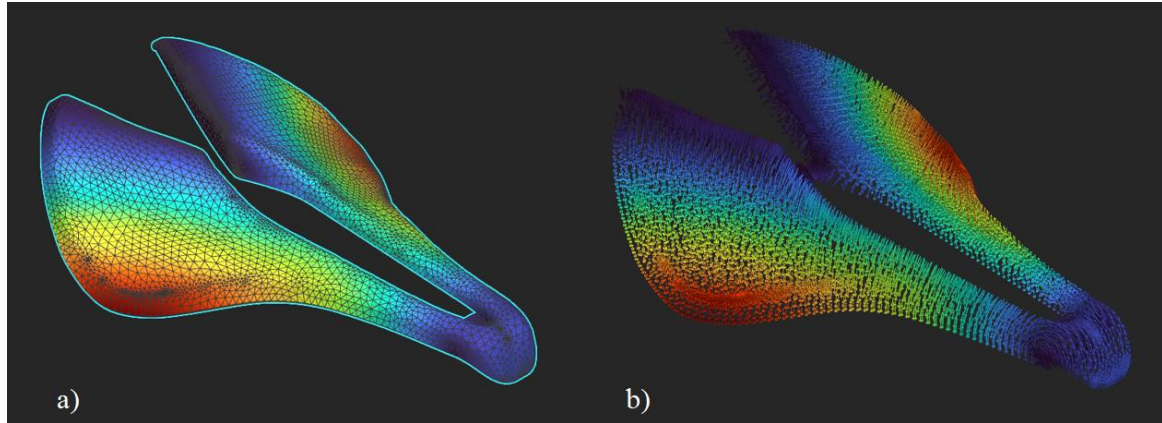


Figure 4. a) Displacements b) Point Map

Figure 5a below illustrates the mesh parameters used in the static analysis to obtain the point map required for generating the optimized Voronoi lattice. The edge length of the surface mesh was set to 3 mm, and the mesh element size was kept large, resulting in a coarser mesh. This approach allowed for a shorter analysis time while still providing sufficient accuracy to obtain the necessary point map. A "Triangle" form mesh element was used for the surface mesh, and a volumetric mesh with the same edge length was derived. Figure 5b below presents the mesh parameters used in the static analysis of the final design. Specifically, the edge length of the mesh elements was reduced, and the number of mesh elements was increased. Mesh metrics were monitored, and optimal values were selected for other parameters to achieve a mesh of sufficient quality for use in the part's analysis.

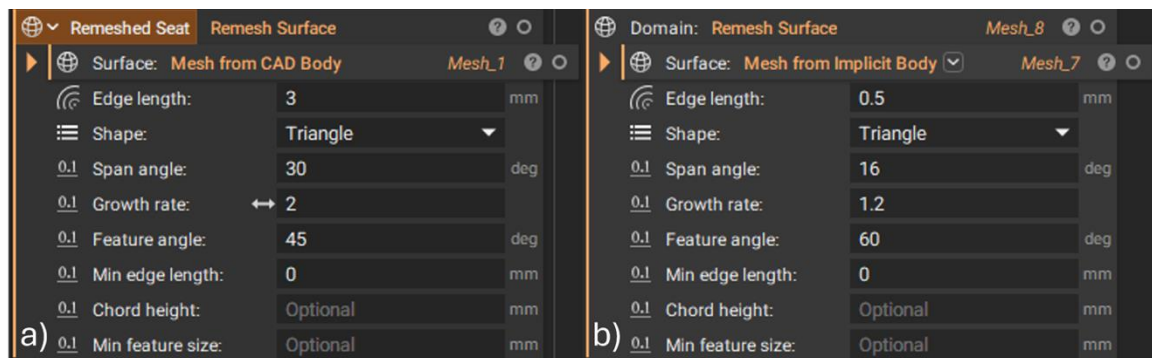


Figure 5. a) Mesh Parameters to Obtain Point Map b) Mesh Parameters for Static Analysis of Voronoi Seat

In creating the implicit field, the "Field from Point Map" function block, where parameters such as interpolation and extrapolation are also adjusted, was used. Functions manipulating the implicit geometry at locations corresponding to the scalar magnitudes contained in the implicit field were utilized [16]. To create the Voronoi lattice in the volume where it will be modeled, the "Random Points in Body" function block, which uses the Pseudorandom Number Generator algorithm at its core, was used to create a stochastic arrangement at the center points. Data-based optimization was performed in the random arrangement using the implicit field, and instead of fixed scalar values for the gaps between the center points, gaps with a gradient transition and variable distances were obtained. Similarly, the thicknesses of the beams forming the Voronoi lattice were also manipulated using the implicit field, achieving the desired gradient transition [17]. As a result, since the surface mesh was also used as a variable in the parameters of the function block forming the Voronoi lattice, a data-based optimized lattice design limited by the surface and fully compatible with it was obtained. Figure 6a below shows the optimized Voronoi lattice. In Figure 6b, the passive regions forming the outer frame of the designed Voronoi seat, which are not in lattice form, are shown in blue.

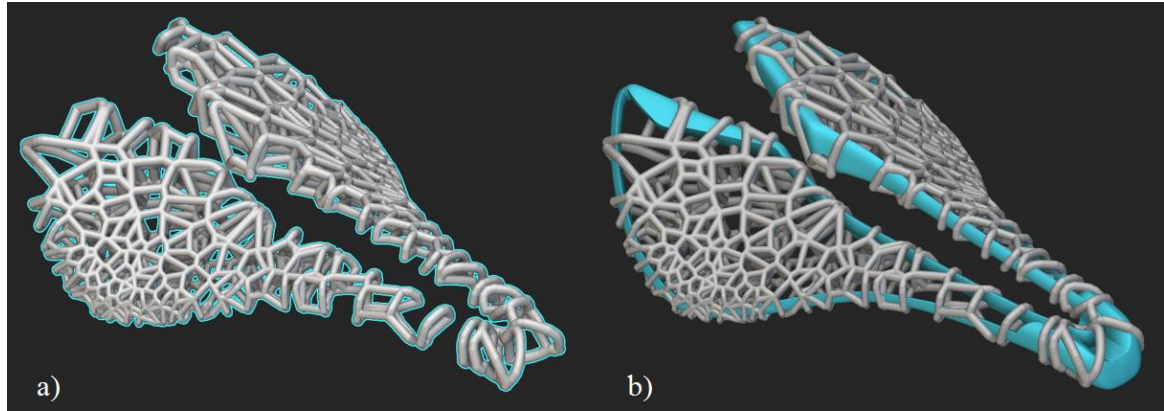


Figure 6. a) Improved Voronoi Lattice b) Passive Zones

In creating the passive regions represented in blue, the edge features and CAD faces referenced from the CAD model of the seat were used. It is important that the offsetting process performed to create solid regions designed based on the CAD faces at the front and rear parts of the seat does not exceed the volumetric boundaries of the seat geometry. Similarly, internal and external edge features also require offsetting after being converted to the implicit body, and it is important that the resulting geometries do not exceed the volumetric boundaries of the seat geometry. Figure 7a below shows the parts where the Voronoi lattice exceeds the volumetric boundaries of the seat. In a seat that can be produced from a rigid material like polyamide, this situation is not acceptable as it can completely eliminate comfort conditions. This issue was resolved by clipping the geometries created by offsetting only in the regions where they intersect with the internal volume of the seat geometry. When this clipping process used for designing the passive regions is also applied to the Voronoi lattice, a smooth surface fully compatible with the seat geometry was obtained, and the result of this process is seen in Figure 7b.

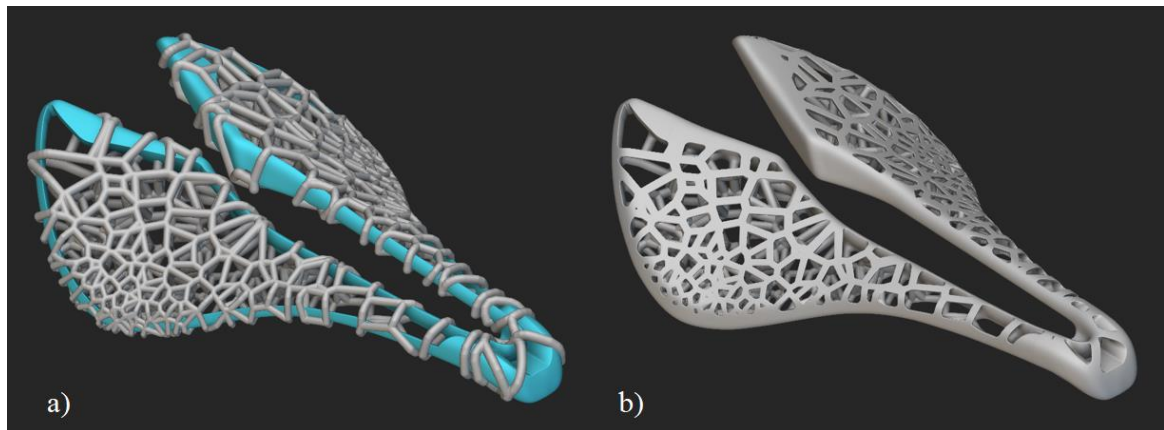


Figure 7. a) Before Trimming b) After Trimming

Figure 8 below shows the optimized seat geometry, lower supports, and the gradient color change representing the geometric change resulting from the analysis in the Voronoi lattice together. The static analysis was completed by defining the relevant parameters within the "Static Analysis" function block, which is natively available in nTopology software.



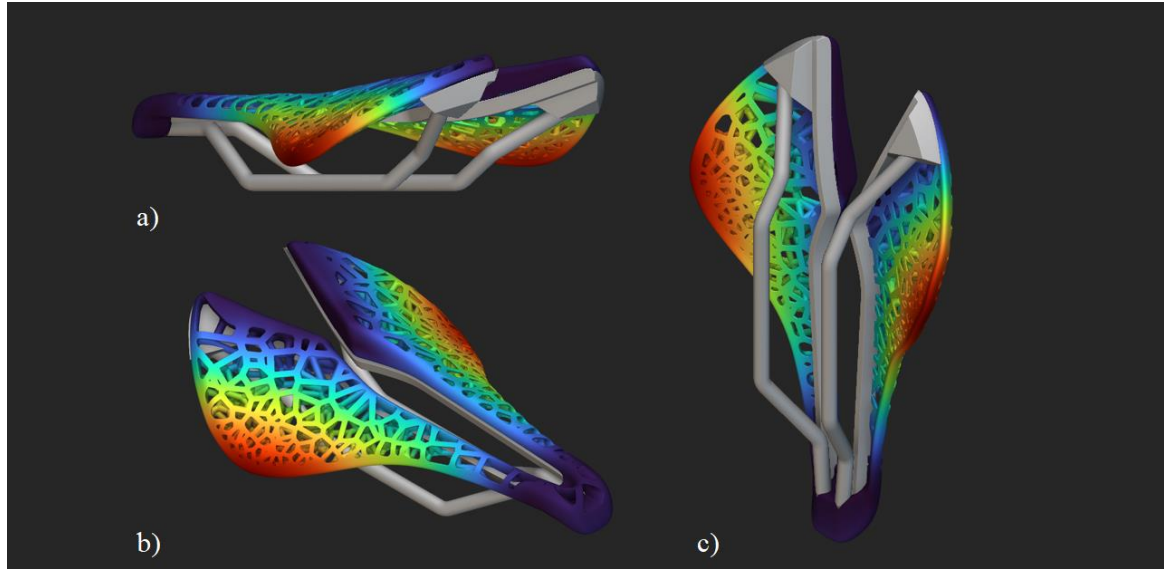


Figure 8. Various perspectives (a, b and c)

### 3. Results and Discussion

In Figure 9 below, the 'Finite Element Volume Mesh' prepared for the static analysis is shown. The mesh consists of 26,039,096 elements and 5,467,823 nodes. To prevent deviations in the analysis results due to insufficient mesh and node counts, the analysis was completed by generating a high number of mesh elements and nodes.

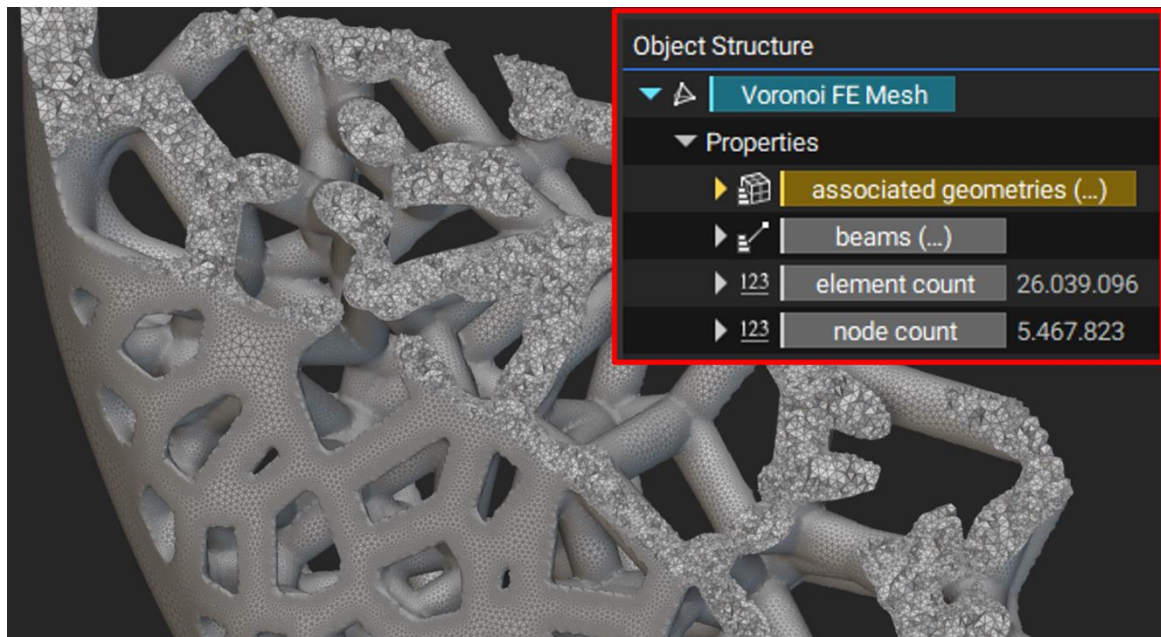


Figure 9. Finite Element Volume Mesh (Element Count and Node Count)

Figure 10a below shows the skewness, one of the mesh quality metrics. The skewness quality can be determined based on its values ranging from 0 to 1. A skewness value close to 0 is desired. Values between [0-0.25] are considered 'excellent', [0.25-0.50] are 'very good', [0.50-0.80] are 'good', [0.80-0.94] are 'acceptable', [0.95-0.97] are 'poor' and [0.98-1.00] are 'unacceptable'. The average skewness value of the mesh for the part is 0.2868, and the skewness values for all mesh elements are visualized using a color gradient. Considering the entire mesh, the skewness metric is rated as 'very good'. Figure 10b below shows the orthogonality, another mesh quality metric. The orthogonality quality can be determined based on its values ranging from 0 to 1. An orthogonality quality value close to 1 is desired. Values between [0.95-1.00] are considered 'excellent', [0.70-0.95] are 'very good', [0.20-0.69] are 'good', [0.15-0.20] are 'acceptable', [0.001-0.14] are 'poor' and [0-0.001] are 'unacceptable'. The

average orthogonality value of the mesh for the part is 0.8761, and the orthogonality values for all mesh elements are visualized using a color gradient. Considering the entire mesh, the orthogonality metric is rated as 'very good'.

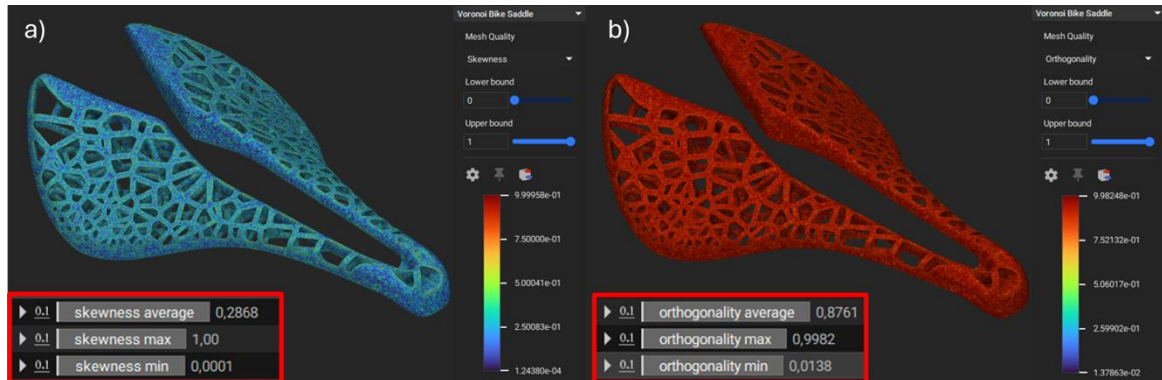


Figure 10. Mesh Metrics a) Skewness b) Orthogonality

In Figure 11a below, when examining the color spectrum resulting from the analysis on the part, it is believed that the stresses are well-distributed across the part. When looking at the minimum and maximum Von Mises stress values, it is observed that the maximum stress value is at the limit of 60 MPa, which is the tensile strength of the selected polyamide PA2200 material. However, the localized value observed here may be misleading. The localized value shown in Figure 11b has resulted from a divergence occurring at a node where a 'mesh singularity' has taken place. To better analyze the stresses, the color spectrum should be adjusted, and the distribution of stresses on the part should be re-examined.

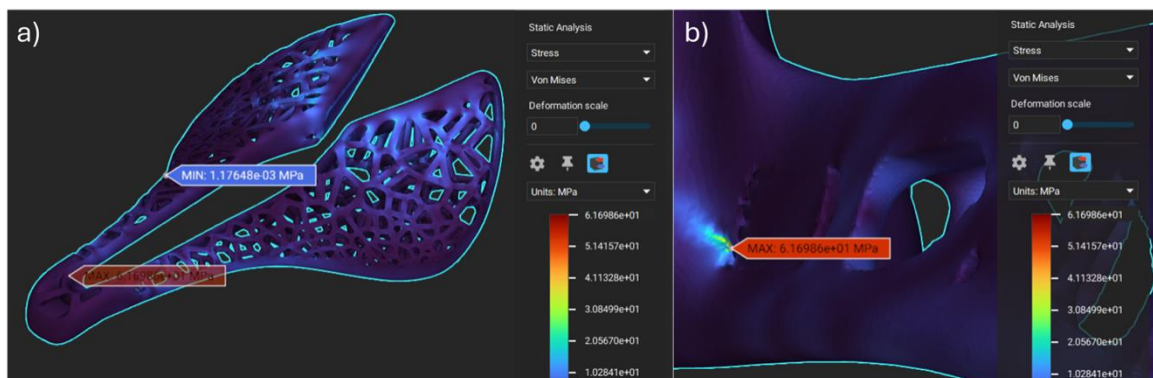


Figure 11. a) Minimum and Maximum Von Mises Values [MPa], b) Mesh Singularity at the Maximum

As seen in Figure 12a below, the color spectrum initially ranges from 0 [MPa] to 60 [MPa]. When the maximum value displayed in the spectrum is reduced from 60 [MPa] to 15 [MPa], as shown in Figure 12b, the sections that are critical under load become much more apparent. The sections with stress values closest to 15 [MPa] and other sections with high stress values are primarily located in the thick beams of the Voronoi lattice and at a few of their corner points. It is observed that the stresses along the cross-sections of the thick beams are generally low. In this case, the safety factor is approximately, and at least, 4, indicating that it is likely to withstand variations in dynamic loading.

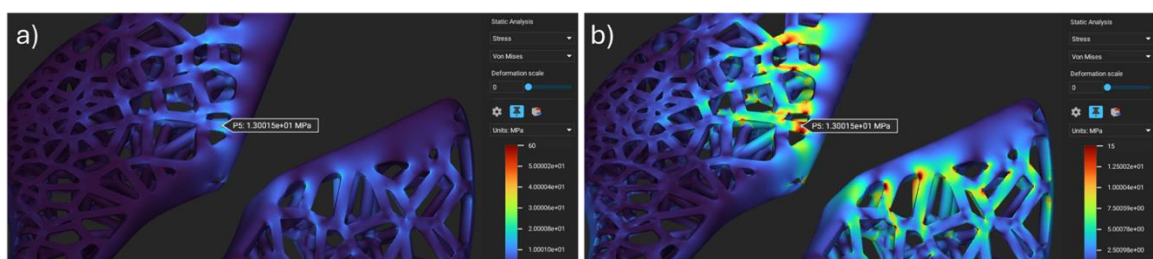


Figure 12. Change in the color spectrum (from 60 MPa (Figure 11a) to 15 MPa (Figure 11b))



As seen in Figure 13 below, the maximum deformation occurred at the furthest point of the seat. It was observed that the maximum displacement value at this location, where elastic deformation occurred, is 1.65 mm.

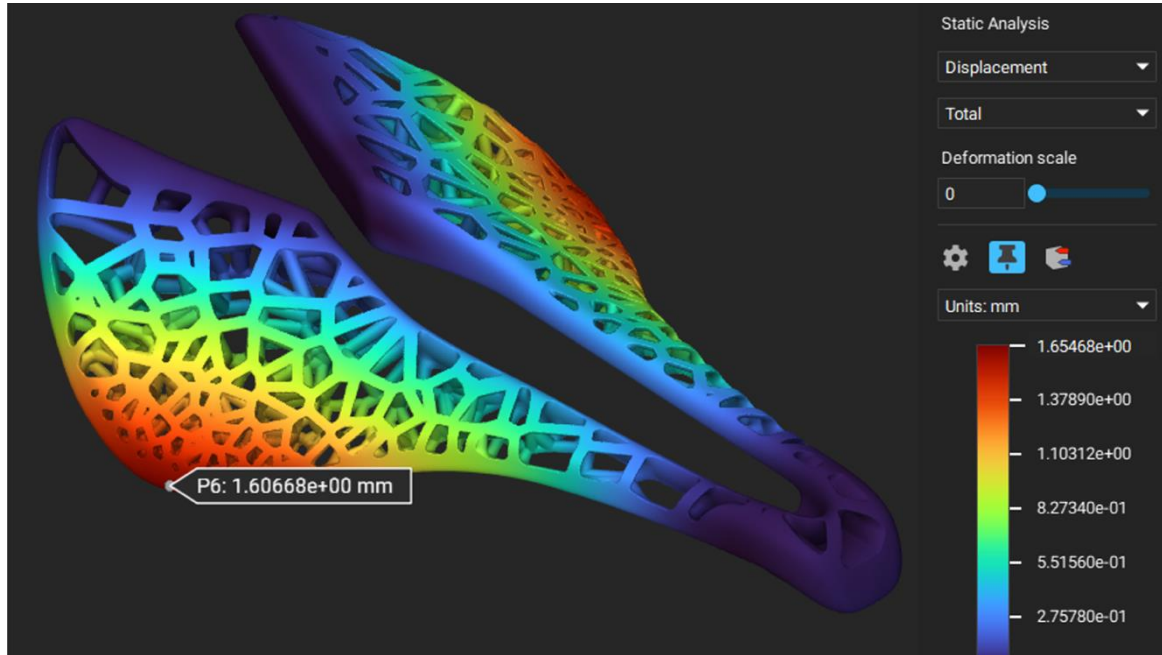


Figure 13. Maximum Displacement [mm]

In Figure 14 below, the weight information of the original design of the seat taken as a reference is 130.61 grams, and the weight information of the optimized Voronoi lattice seat design is 64.45 grams, given separately. The weight gain compared to the original design is 50.65%, achieving a gain of half.

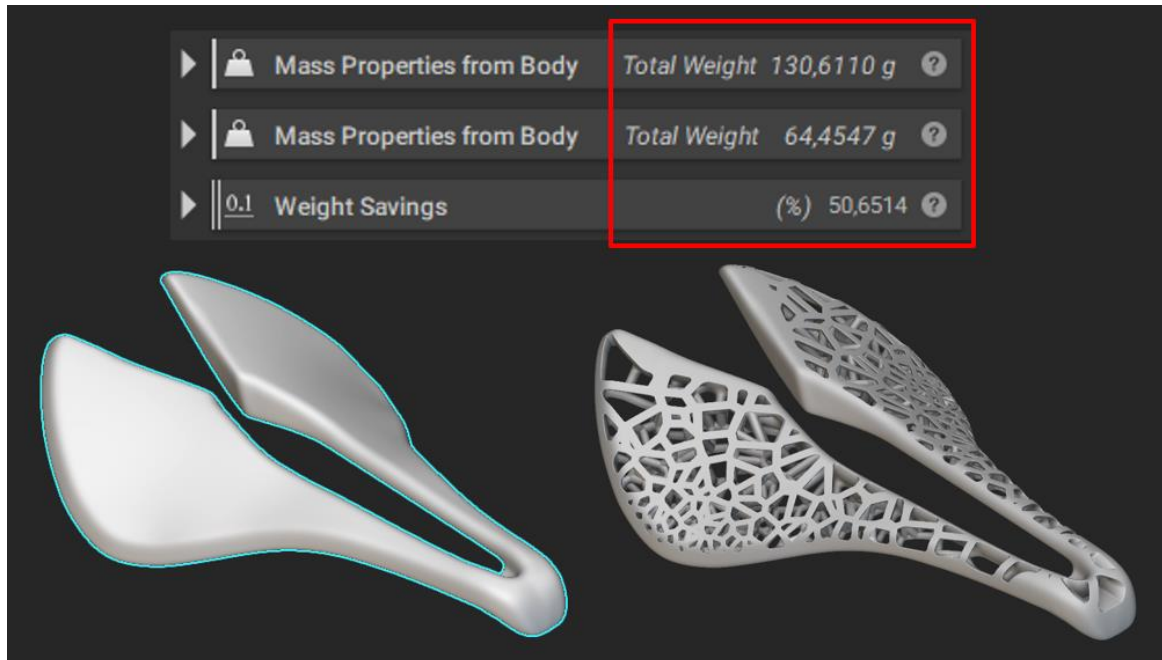


Figure 14. Total Weight and Weight Savings Ratio

#### 4. Conclusion

In this study, a methodology developed using nTopology software to reduce the weight of racing bicycle saddles has been presented. The study initially involves taking a CAD model as input and subsequently optimizing this model using the "Implicit Modeling" method within the nTopology software. Instead of

the boundary representation of the CAD model, implicit modeling, which uses geometries defined by mathematical functions, allowed for the data to be stored in smaller file sizes and enabled effective analysis despite the complexity of the model.

In the static analyses conducted, the maximum elastic displacement value for the saddle designed with PA2200 polyamide material was measured as 1.65 mm. This displacement occurred particularly at the farthest point of the saddle surface, facilitating the analysis of stress concentrations in the Voronoi saddle. The results obtained indicate that the combination of the selected material and geometry can operate safely within certain limits. Furthermore, the maximum stress value observed in the critical sections as a result of the Von Mises stress analysis was determined to be around 15 MPa. However, it was also considered that a point value appearing as 60 MPa could be misleading, possibly resulting from a local "mesh singularity."

Additionally, it was found that the Voronoi lattice structure used in the study is highly effective in both reducing structural weight and maintaining mechanical strength. As a result of the optimization, the weight of the saddle design was reduced by 50.65%, from 130.61 grams to 64.45 grams. This significant weight reduction technique could offer a major advantage, especially in sectors such as aerospace and automotive, where weight reduction is crucial. Furthermore, it is believed that the generally low stress distributions observed in the cross-sections of the thick beams of the saddle could enhance the design's durability against dynamic loads.

The methodology used in this study is also thought to provide significant advantages in the industrial design processes by integrating complex geometries into the production process. Particularly, the combined use of parametric modeling and implicit modeling methods offers flexibility in the design process while also considering manufacturing constraints. These approaches enable the creation of geometries that are difficult to achieve with traditional CAD modeling methods. Moreover, the applicability of this methodology in other engineering fields suggests that the study could have a broad impact in both industrial and academic domains.

In future studies, further research and development of implicit modeling techniques should be pursued, along with testing and adapting the methodology for different industrial design applications, conducting more detailed experiments to increase the accuracy of the analyses, and further investigating how implicit modeling can be used in other industrial applications. The literature contains example studies on how it can be utilized in various industrial design applications. One such example is the design of a heat exchanger composed of gyroid unit cells using the implicit modeling technique. Gyroid unit cells have a wall that can separate the cold and hot fluids, thereby enabling heat transfer through the thin-walled gyroid unit cells [18]. In another study, a jet engine bracket was optimized using a variable lattice structure and was able to maintain its strength under the defined boundary conditions according to the static analysis results. Implementing these recommendations can enable a broader range of applications for implicit modeling and improve industrial design processes.

In conclusion, implicit modeling techniques stand out as an effective tool in meeting the requirements for weight reduction and structural optimization. The method presented in this study could offer important opportunities for university-industry collaboration, particularly in the redesign of parts used in strategic sectors. In this context, collaborations with critical institutions such as TEI could contribute to our country's ability to produce internationally competitive projects.

## Acknowledgment

This research was conducted utilizing the workstation provided through the DPU BAP 2023-27 Scientific Research Project. We extend our sincerest gratitude to the nTopology team for their license and support.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

## References

- [1] B. Courter, "How implicits succeed where B-reps fail," *ntopology.com*, 2019. [Online]. Available: <https://ntopology.com/blog/how-implicits-succeed-where-b-reps-fail/>. [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [2] R. Yeşiloğlu, R. Özmen, and M. Günay, "The Effects of Infill Geometry and Porosity Ratio on Mechanical Properties of PLA Structures Produced by Additive Manufacturing," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 291–303, 2023. doi:10.30855/gmbd.0705071
- [3] G. Akıncıoğlu and E. Aslan, "Investigation of tribological properties of amorphous thermoplastic samples with different filling densities produced by an additive manufacturing method," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 540–546, 2022. doi:10.30855/gmbd.0705041
- [4] nTopology, "8 Benefits of Lightweighting in Manufacturing & Engineering," *ntopology.com*, 2022. [Online]. Available: <https://ntopology.com/blog/8-lightweighting-benefits-in-manufacturing-engineering/>. [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [5] nTopology, "Lightweighting Applications through Smart Engineering Design," *ntopology.com*, 2022. [Online]. Available: <https://ntopology.com/blog/lightweighting-applications/>. [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [6] N. Top, İ. Şahin, and H. Gökçe, "The Mechanical Properties of Functionally Graded Lattice Structures Derived Using Computer-Aided Design for Additive Manufacturing," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, pp. 11667, 2023. doi:10.3390/app132111667
- [7] Y. Tang, G. Dong, Q. Zhou, and Y. F. Zhao, "Lattice structure design and optimization with additive manufacturing constraints," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 1546–1562, 2017. doi:10.1109/TASE.2017.2685643
- [8] N. Top, İ. Şahin, S. K. Mangla, M. D. Sezer, and Y. Kazancıoğlu, "Towards sustainable production for transition to additive manufacturing: a case study in the manufacturing industry," *International Journal of Production Research*, vol. 61, no. 13, pp. 4450–4471, 2023. doi:10.1080/00207543.2022.2152895
- [9] Z. Wang, Y. Zhang, and A. Bernard, "A constructive solid geometry-based generative design method for additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 41, pp. 101952, 2021. doi:10.1016/j.addma.2021.101952
- [10] G. Allen, "nTopology Modeling Technology," nTopology Whitepaper, 2022. [Online]. Available: [https://design-with.ntopology.com/rs/341-JSR-605/images/nTopology\\_Whitepaper-Implicit\\_modeling\\_technology-4.pdf](https://design-with.ntopology.com/rs/341-JSR-605/images/nTopology_Whitepaper-Implicit_modeling_technology-4.pdf). [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [11] B. Courter, "Product Data Models for Rapid Development," *ntopology.com*, 2019. [Online]. Available: <https://ntopology.com/blog/field-driven-design-product-data-models-for-rapid-collaborative-development/>. [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [12] N. Top, İ. Şahin, H. Gökçe, and H. Gökçe, "Computer-aided design and additive manufacturing of bone scaffolds for tissue engineering: state of the art," *Journal of Materials Research*, pp. 1–21, 2021. doi:10.1557/s43578-021-00156-y
- [13] L. Onita, "NASA invests in ultra-lightweight tech for space missions," *eandt.theiet.org*, E&T Magazine, 2015. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2015/04/nasa-invests-in-ultra-lightweight-tech-for-space-missions/>. [Accessed: Jan. 30, 2023].
- [14] B. Becergen, M. Çakmak, M. F. Maral, A. Dayanc, and F. Karakoç, "Design Approaches on Inner Bodies of Gears with Methods Topology Optimization and Lattice Structures," *European Journal of Science and Technology*, vol. 39, pp. 85–90, Jul. 2022. doi:10.31590/ejosat.1144818
- [15] U. Es, O. Maviş, A. Dayanc, and F. Karakoç, "Multi-Axis Robot Arm Design and Topology Optimization," in *Proc. of the 6th Engineers of Future International Student Symposium*, Zonguldak, Türkiye, Jul. 1–2, 2022.
- [16] A. Yenigün, H. A. Genç, A. Dayanc, and F. Karakoç, "Creating CAD Model of A Damaged Propeller Using Optical Scanning And Reverse Engineering Methods," in *Proc. of the EFIS 2021*, Zonguldak, Türkiye, Jul. 9–11, 2021, pp. 386–393.
- [17] B. Köse, M. E. Akçay, A. Dayanc, and F. Karakoç, "Structural Analysis and Topology Optimization of Crane Hook," in *Proc. of the 6th Engineers of Future International Student Symposium*, Zonguldak, Türkiye, Jul. 1–2, 2022, pp. 139–145.
- [18] A. Dayanc, M. Canlıdinc, and F. Karakoç, "An Innovative Methodology to Design Gyroid Heat Exchangers For Metal Additive Manufacturing," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 7, no. 3, pp. 478–484, 2023. doi:10.46519/ij3dptdi.1365189

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Production of Alumina-Silica Based Composite Aerogel Powder from Perlite, Diatomite, Zeolite and Chamotte Brick Mortar

Özge Kılınç<sup>a</sup>, Nil Toplan<sup>b</sup>

Submitted: 02.04.2024 Revised: 17.08.2024 Accepted: 24.10.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR08

### ABSTRACT

**Keywords:** Alumina-silica aerogel, perlite, diatomite, zeolite, chamotte brick mortar, sol-gel

<sup>a</sup> Sakarya University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Metallurgical and Materials  
Engineering  
54050 - Sakarya, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-4051-3970  
e mail: [ozgekilinc1998@gmail.com](mailto:ozgekilinc1998@gmail.com)

<sup>b</sup> Sakarya University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Metallurgical and Materials  
Engineering  
54050 - Sakarya, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-4130-0002  
e mail: [toplan@sakarya.edu.tr](mailto:toplan@sakarya.edu.tr)

\*Corresponding author:  
[ozgekilinc1998@gmail.com](mailto:ozgekilinc1998@gmail.com)

In this study, alumina-silica based aerogel powder was produced by the sol-gel method under atmospheric drying conditions using natural raw materials such as perlite, diatomite and zeolite as silica source and chamotte brick mortar as alumina source. Silica aerogels have superior properties such as low density, high porosity and thermal insulation. However, their dimensional stability and mechanical strength are poor at high temperatures. Alumina-silica based aerogel compositions have the potential to expand their application areas with a significant improvement in material performance. In this study, powders (perlite, diatomite, zeolite and chamotte brick mortar) were used as silica and alumina sources, NaOH, HCl as base and acid sources and ethanol to strengthen the gel structure. The powders were dissolved by boiling in NaOH solutions and neutralised after filtration. The gel was surface modified with ethanol at room temperature. The powders dried at 120°C at atmospheric pressure for 2 days were characterized using FTIR, XRD, SEM, and BET devices, and the densities of aerogel powders were calculated. As a result of the experimental studies and analyses, it was determined that alumina-silica aerogel powders with superior properties were synthesised by atmospheric pressure drying technique.

## Perlit, Diatomit, Zeolit ve Şamot Tuğla Harcından Alümina-Silika Esaslı Kompozit Aerojel Tozu Üretimi

### ÖZ

Bu çalışmada, alümina-silika esaslı aerojel tozu; silika kaynağı olarak perlit, diatomit ve zeolit gibi doğal hammaddeler ve alümina kaynağı olarak şamot tuğla harcı kullanılarak atmosferik basınçta kurutma koşulları altında sol-jel yöntemiyle üretilmiştir. Silika aerojeller düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ve ısı yalıtımı gibi üstün özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, boyutsal kararlılıkları ve mekanik mukavemetleri yüksek sıcaklıklarda zayıftır. Alümina-silika esaslı aerojeller, malzeme performansında önemli bir iyileşme ile uygulama alanlarını genişletme potansiyeline sahiptir. Çalışmada silika ve alümina kaynağı olan tozlar (perlit, diatomit, zeolit ve şamot tuğla harcı), baz ve asit kaynağı olarak NaOH, HCl ve jel yapısını güçlendirmek için etanol kullanılmıştır. NaOH çözeltilerinde kaynatılarak çözüldürülen tozlar, filtrasyon işleminin ardından nötralize edilmiştir. Jelin, oda sıcaklığında etanol kimyasal yüzey modifikasyonu yapılmıştır. 2 gün boyunca atmosferik basınçta 120°C'de kurutulmuş tozlar F kullanılarak karakterize edildi. Atmosferik basınçta 120°C'de 2 gün boyunca kurutulmuş aerojel tozları FTIR, XRD, SEM ve BET cihazları kullanılarak karakterize edilmiş ve yoğunlukları hesaplanmıştır. Atmosferik basınçta kurutma tekniği ile üstün özelliklere sahip alümina-silika esaslı aerojel tozlarının sentezi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alümina-silika aerojel, perlit, diatomit, zeolit, şamot tuğla harcı, sol-jel

## 1. Giriş (Introduction)

Aerojeller %99 oranında yapılarında hava barındırdıkları için en düşük yoğunluğa ( $0,001-0,5 \text{ g/cm}^3$ ) sahip açık gözenekli malzemelerdir [1]. İçinde barındırdığı açık gözenekler malzemenin içini bir ağ gibi kuşatarak düşük termal iletkenlik katsayısı ve düşük dielektrik sabiti gibi özellikler sağlamaktadır. Gözenekli ve nanoboyutlu parçacıklardan oluşan özgün mikroyapıları nedeniyle oldukça fazla uygulama alanlarına sahiptirler ve farklı yöntemler ile üretilebilmektedir [2]. Aerojeller yüksek yüzey alanı, düşük yığın yoğunluğu, yüksek çapraz bağlanabilme kabiliyetleri ve sürekli gözeneklilik gibi üstün özelliklerinden dolayı ısı yalıtım malzemeleri, katalizör, dolgu maddeleri ve adsorban malzemeleri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [3]. Alümina-silika esaslı aerojeller düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle sıcaklığa duyarlı, enerji verimli ürünler elde etme yetenekleri ve diğer yalıtım malzemelerinden çok daha üstün özelliklere sahip olmaları sebebiyle ısı yalıtımı uygulamaları için büyük potansiyele sahiptirler [4]. Aerojeller sentetik hammaddelerin yanı sıra atık ve doğal malzemeler kullanılarak da elde edilebilmektedir. Bilinen aerjel türleri; silika aerojeller, alümina aerojeller, karbon aerojeller ve diğer aerojeller (kompozit, nanotüp, yarı iletken metal aerojeller ve polimer aerojeller vb.) şeklindedir [5].

Yapılan çalışmalarda silika matrisine daha yüksek boyutsal kararlılığa ve termal stabiliteye sahip bir refrakter fazın (alümina) eklenmesi ile gözenek stabilitesinin ve düşük termal iletkenlik değerlerinin ( $81 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'in altında)  $1200-1400^\circ\text{C}$ 'ye kadar korunduğu görülmüştür [6]. Saf alümina aerojeller, genellikle düşük termal iletkenliğe sahiptir. Ancak, alümina-silika kompozit aerojellerde silika bulunması, bu malzemelerin termal iletkenliğini artırabilir [7]. Dolayısıyla, kompozitler genellikle saf alümina aerojellerden daha yüksek bir termal iletkenliğe sahip olabilirler. Silika, alüminaya kıyasla daha düşük mekanik dayanıklılığa sahiptir. Bu durum, alümina-silika kompozit aerojellerin genellikle saf alümina aerojellerden daha az, silika aerojellerden daha fazla mekanik dayanıklılığa sahip olabileceği anlamına gelmektedir [8]. Alümina, genellikle kimyasal olarak inert bir malzeme olarak kabul edilirken, silika bazı kimyasallara karşı daha hassas olabilir. Bu, kompozit aerojellerin kimyasal dayanıklılığının saf alümina aerojellere kıyasla değişebileceği anlamına gelmektedir. Alümina-silika kompozit aerojeller, belirli uygulama alanlarında (örneğin, belirli sıcaklık veya kimyasal koşullarda) daha uygun olabilirken, saf alümina aerojeller diğer durumlarda daha avantajlı olabilir [9,10]. Alümina-silika kompozit aerojellerin yüzey özellikleri, saf alümina aerojellerden farklı olmaktadır [8].

Aerojeller sol-jel prosesi ile çözeltiye alma-jelleştirme, yaşlandırma ve kurutma aşaması olmak üzere 3 temel adımda üretilmektedir [5]. Çözeltiye alınabilen tüm doğal hammaddeler/atıklarla başlatılan üretim süreci; kurutma tipine göre (süper kritik, dondurucu ve atmosferik şartlarda kurutma gibi) değişik özellikler sergilemektedir. Sol-jel yöntemi ile jel hazırlama, yaşlandırma ve kurutma aşamalarından geçirilerek alümina-silika kompozit aerojellerin üretiminin ilk aşamasında silika ve alümina kaynakları ayrı ayrı olarak çözeltiye alınabilmektedir Alümina ve silika sol çözeltilerinin birleştirilmesiyle hazırlanan çözeltiye katalizör eklendiğinde jelleşme meydana gelmektedir. Yaşlanma aşamasında, alümina-silika ağına yeni monomerlerin eklenmesi ile [11,12], aerojellerin stabilitesi ve gücü artarak jel bağları güçlenmektedir [3]. Alümina-silika aerjel yapısındaki bağları güçlendirmek ve malzemenin mukavemetini arttırmak için yaşlandırma aşamasında yüzey modifikasyonu yapılmaktadır. Sol-jel yöntemi ile jelin porozitesi, yoğunluğu ve diğer fiziksel özelliklerinde değişiklikler yapılarak, son ürünün istenen özellikleri belirlenebilmektedir [13,14].

Şamot ateş tuğlası en çok kullanılan refrakter malzemelerden biridir [15] ve yapısındaki ağ. %53 üzerindeki alümina sayesinde mevcut çalışmada alümina kaynağı olarak kullanılmıştır. Silika kaynağı olarak diatomit (% ağ.  $85 \text{ SiO}_2$ ), perlit (% ağ.  $74 \text{ SiO}_2$ ) ve zeolit (% ağ.  $72 \text{ SiO}_2$ ) kullanılmıştır.

Şamot ateş tuğlasının yüksek sıcaklık dayanımı ve izolasyonu sağlama yeteneği sayesinde sanayide %55 seviyelerinde metalürji, petrokimya ve rafineri, seramik ve cam ergitme sektörlerinde kullanılmaktadır [15]. Bina yapımında kullanılmayan atık tuğlalar şamot haline getirilebilir [16]. Genellikle feldspatik kayaların çözünmesi sonucu oluşan kil yapısında çözünme esnasında oluşan mineralleri de yapılarında barındırabilirler. Şamot (ateş) killerinin toplam 100 milyon ton civarındaki rezervinin 66 milyon tonu İstanbul'da Sarıyer, Eyüp, Şile, Büyükdere ve Rami, kalanı Çankırı-Korkun, Bilecik-Söğüt-İnhisar ve Kayseri-Selahiye-Badanlık'ta bulunmaktadır [15].

Diatomitin farklı kullanım alanlarına yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların; filtrasyon işlemleri, katkı maddesi veya dolgu malzemesi, katalizör taşıyıcısı, kimyasal madde hazırlanmasında



silika kaynağı, izolasyon ve refrakter malzemesi üretiminde, hafif yapı malzemesi ve seramik hammaddesi olarak kullanımı ile diğer kullanım alanlarına yönelik birçok araştırmalar olduğu görülmektedir [17]. Türkiye'nin diatomit rezervi 125 milyon tondur [18]. Tonak ve ark., diatomit atıklarının farklı oranlarda portland çimentosu klinkerine katılarak çimento üretiminde [19], Gökçe, diatomitin üre-formaldehit bağlayıcısıyla birlikte hafif yapı elemanı üretiminde [20], Ünal ve Uygunoğlu, diatomit agregalarının hafif beton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır [21]. Bu kaynakların bolluğu ve endüstriyel atıkların büyük miktarda üretilmesi, üretimi karlı hale getirebilmektedir.

Silika kaynağı olarak kullanılan perlit, doğal olarak oluşan silika esaslı volkanik kayalara verilen isimdir [3]. Perlit diğ er volkanik tozlardan ayıran en önemli özelliğ i yumuşama sıcaklığı civarında ısıtıldığında orijinal hacminin yaklaşık 20 katına kadar çıkabilmesidir. Dünya rezervinin büyük çoğunluğ u Türkiye'de olan perlit hammaddesi 870°C'nin üzerine hızla ısıtıldığında termal olarak genişerek çok sayıda gözenek oluşturabildiğ inden [22]; bu gözenek yapısı sayesinde mükemmel ısı ve ses yalıtım özelliğ i göstermektedir [23]. Perlit, inşaat malzemeleri endüstrisinin yanı sıra tarım, bahçecilik vb. alanlarda da değerli bir hafif malzemedir. Genleştirilmiş perlitin hem üretimi hem de işlenmesi sırasında, bir miktar ince taneli atık perlit oluşmaktadır. Atık genleştirilmiş perlitin son derece düşük yağın yoğunluğ u nedeniyle taşınması, kullanılması zordur ve toz oluşumuna neden olmaktadır [23]. Atık genleştirilmiş perlitin; Kotwica ve arkadaşlarınca yüksek performanslı puzzalonik çimentoda [24], El Mir ve G. Take tarafından betonda dolgu malzemesi olarak [25] kullanımı araştırılmıştır. Jia ve arkadaşları ise genleştirilmiş perlitin gözenekli yapısına aerogelin doldurulmasıyla binalarda yeni bir ısı yalıtım malzemesi kompoziti aerogel/genleştirilmiş perlit (AEP) üretiminde [26] kullanımı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır.

Zeolitler 1756 yılında İsveçli mineralog Axel Fredrik Cronstedt tarafından keşfedilen yüksek yüzey alanına (350–450 m<sup>2</sup>/g) neden olan, moleküler boyutlarda düzenli ve tek tip gözeneklere ve kanallara sahip mikro gözenekli kristalli alümina silikatlardır. Zeolitler büyük ölçekte üretilmektedir saf silis içeriğ i, düşük yoğunluğ u, hafifliğ i, gözenek boyutu ve yapısı sayesinde adsorban olarak, su arıtmada, gaz ayırmada, ilaç taşınımında, tarımda, fotovoltaiik güneş pillerinde, petrol rafinasyonunda, tarım hayvancılıkta, metalürji malzeme ve petrokimya endüstrilerinde ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Zeolitler hidrotermal sentez yoluyla üretilmekte olup bu sürecin ilk adımı, silika ve alümina içeren amorf reaktanların bazik bir ortamda bir katyonla birlikte karıştırılmasıdır. Karışım sonrasında bir otoklavda 100°C'nin üzerine ısıtarak bu sıcaklıkta amorf alüminosilikat hidrojelden kristal alüminosilikat zeolitlere dönüşümün gerçekleşmesi için bekletilir ve sonrasında filtrasyon, yıkama ve kurutma işlemlerinden sonra son haline getirilir. Zeolitler gözeneklilik, gözenek boyutu, asitlik, bazlık, yüzey alanı, yaklaşık 800°C'ye kadar termal kararlılık gibi birçok avantaja sahiptir ve özel gereksinimleri karşılamak üzere modifiye edilebilirler. Zeolitlerdeki gözenek boyutları 0,3-1,0 nm arasında değ işir [3,27,28]. Doğal ve saf zeolitlerin kullanımı 1950'li yıllardan sonra deniz ve gölsel tüflerde zeolit ham maddesine rastlanması ile yaygınlaşmaya başlamıştır [3]. Sashkina ve arkadaşları silika aerogel matrisine gömülü Fe içeren zeolit nanokristallere dayanan yeni kompozit malzeme üretmişler ve bu malzemenin; N<sub>2</sub>O ile benzenin fenole hidroksilasyonu, nitrik oksidin amonyak ile katalitik indirgenmesi, organik bileşiklerin değerli ürünler üretmek için hidrojen peroksit ile kısmi oksidasyonu, organik kirleticilerin toplam oksidasyonu yoluyla suyun arıtılması ve radyoaktif atıklardan radyonüklitlerin uzaklaştırılması gibi çeşitli uygulamalarda kullanılma potansiyeli taşıyacağı çalışma kapsamında vurgulanmıştır [28].

Bu çalışmada alümina-silika kompozit aerojelleri üretmek için pahalı sentetik malzemeler yerine şamot tuğla harcı, perlit, diatomit ve zeolit gibi doğal hammadde kaynakları kullanılarak daha ekonomik olarak ve çevre dostu üretim gerçekleştirilmiştir. Alümina-silika aerojelleri genellikle pahalı sentetik ve çevreye zararlı başlangıç malzemeleri kullanılarak sentezlenebildiğ inden [2,3,5,8], bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çevre dostu doğal aerogel hammadde kaynakları kullanılarak üretim yapılmasına yönelik çalışmalar geliştirilmeye devam edilmelidir. Wang ve arkadaşları 2013'te yaptıkları çalışma kapsamında diatomitten silika esaslı aerogel üretmişlerdir [29]. Hu ve arkadaşları 2016 yılında, hammadde olarak kaolen içeren ve ortam basıncında kurutulan hidrofobik silika aerojelleri sentezlemişlerdir [30]. Zhu ve arkadaşları 2015 yılında bekleme süresi ve kalsinasyon sıcaklığı etkilerini araştırdıkları bir çalışmada, sıfır maliyetli madencilik atığı olan kömür gangını hammadde olarak kullanarak SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aerogeli sentezlemişlerdir [31]. Aerogel üretimi esnasında tercih edilen kurutma işlemi, önemli ve kritik bir parametredir. Süperkritik kurutma, maliyeti arttırırken çok pahalı ve büyük miktarda enerji kullanımına yol açmaktadır. Dolayısıyla çalışma

kapsamında daha ucuz ve doğal hammaddelerin kullanılması ve kurutma işleminin atmosferik basınç koşullarında gerçekleştirilmesi ile hem hammadde hem de üretim maliyeti düşürülmüştür. Bu çalışmada, silika kaynağı olarak perlit, diatomit ve zeolit, alümina kaynağı olarak ise şamot tuğla harcı kullanarak, sol-jel metodu ile farklı Al/Si oranlarında atmosfer basıncında kurutma ile alümina-silika esaslı aerojel tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen aerojel tozları taramalı elektron mikroskobu (SEM), XRD (X-Ray Difraktometre), FTIR ve BET cihazları kullanılarak karakterize edilmiş; yoğunluk ve termal iletkenlik katsayıları hesaplanmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

### 2.1. Başlangıç malzemeleri (Precursor materials)

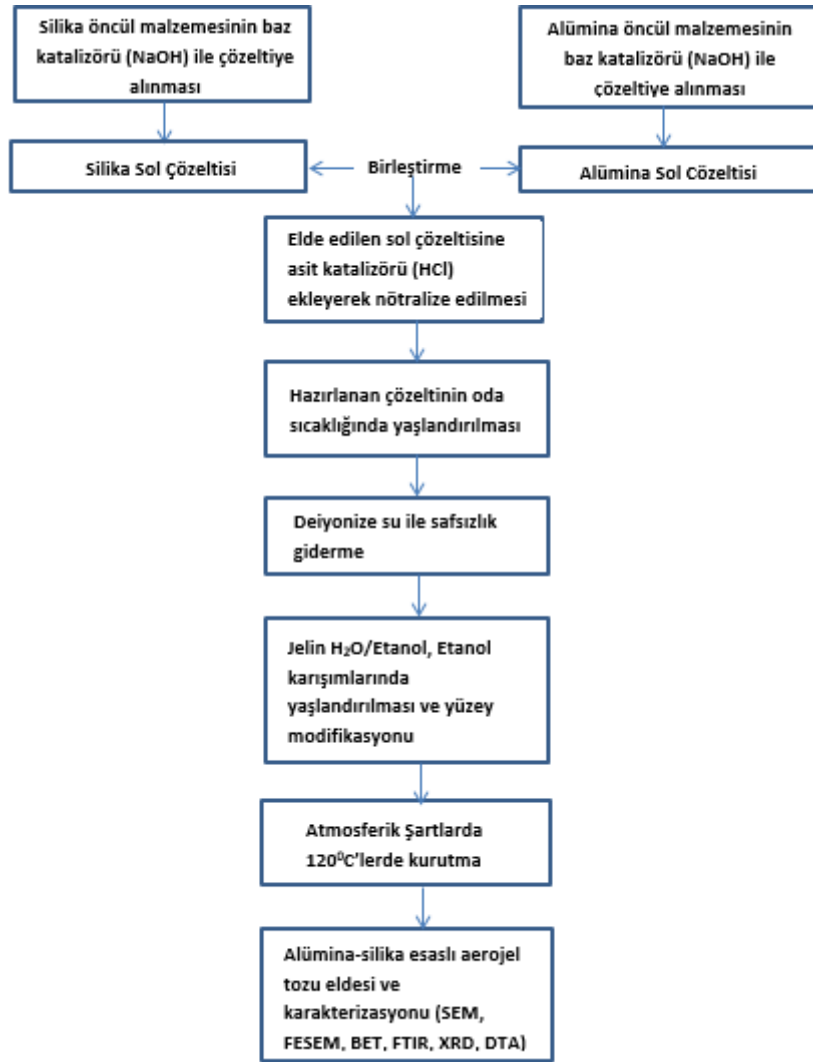
Çalışmada baz kaynağı olarak NaOH (Merck Kimya 40 g/mol), asit kaynağı olarak HCl (Merck Kimya %37), silika kaynağı olarak perlit, diatomit ve zeolit tozları, alümina kaynağı olarak ise şamot tuğla harcı kullanılmıştır. Perlit, diatomit, zeolit ve şamot tuğla harcının kimyasal bileşimleri XRF analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 1'de paylaşılmıştır. Ayrıca jel yapısını modifiye etmek ve güçlendirmek için Etanol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (Isolab %99,9) kullanılmıştır. Perlit malzemesinde silika içeriği ağırlıkça %74, diatomit tozunda ağırlıkça %85, zeolitte ise ağırlıkça %72, şamot tuğlasında ise alümina oranı ağırlıkça %53 iken; silika içeriği ağırlıkça %42'dir. Üretim sırasında jelin yıkanması aşamaları saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen tüm numuneler 3 Molar (M) hacminde baz/asit çözeltileri kullanılarak hazırlanmıştır. H1 kodlu aerojel tozu 10 gr perlit, 20 gr şamot tuğlası ile, H2 kodlu aerojel tozu 10 gr diatomit, 20 gr şamot tuğlası ve H3 kodlu aerojel tozu 10 gr zeolit ve 20 gr şamot tuğlası kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 1. Perlit, diatomit, zeolit ve şamot tuğla harcının kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of perlite, diatomite, zeolite and chamotte brick mortar)

Bileşenler	Hammaddeler (% ağı.)			
	Perlit	Diatomit	Şamot tuğlası	Zeolit
SiO <sub>2</sub>	74	85	42	71,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,33	5	53	13,2
CaO	0,58	1	0,3	2
K <sub>2</sub> O	4,95	-	-	3,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,97	1,5	1,5	1,4
MgO	0,28	0,5	0,2	1,1
Na <sub>2</sub> O	3,5	-	-	0,3

### 2.2. Deneyin yapılışı (Experimental procedure)

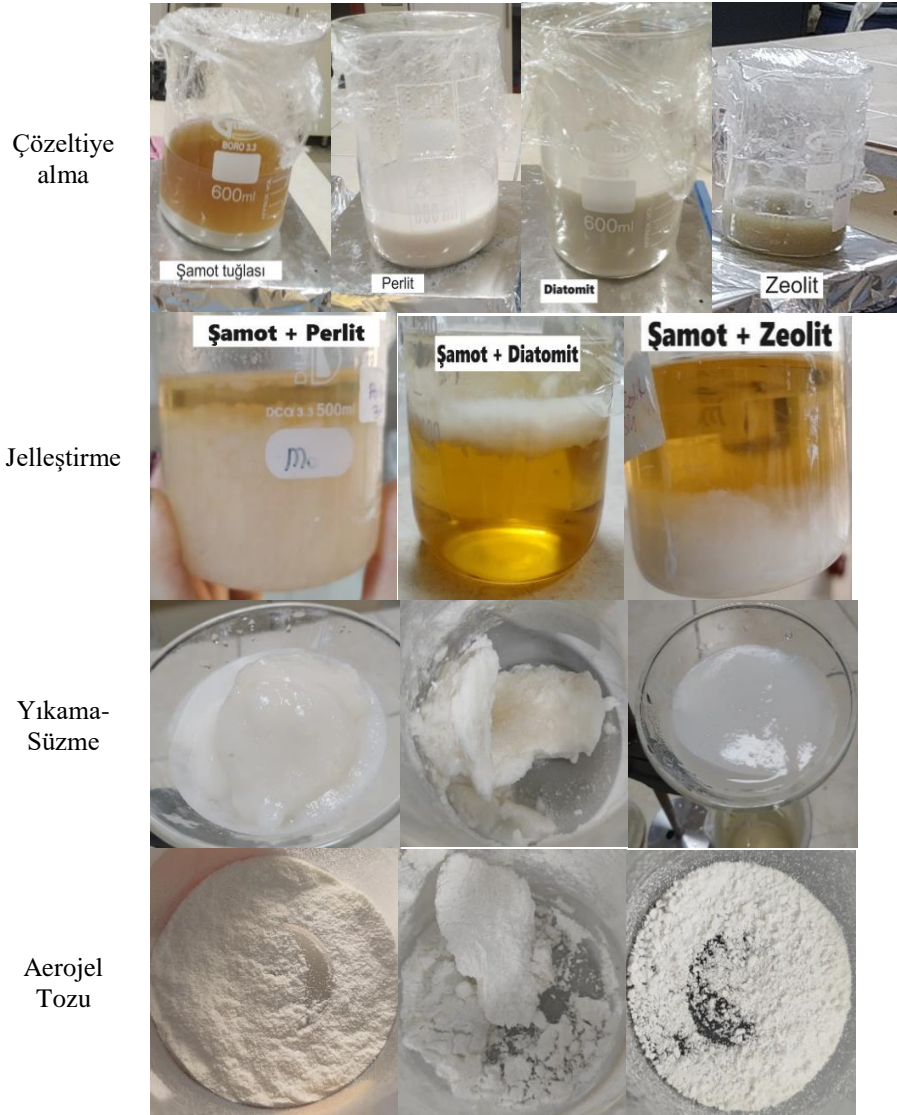
Hammaddeler (Şamot tuğlası, diatomit, zeolit ve perlit tozları) çözeltiliye alma işlem kademesi öncesi 45 µm'luk elekten geçirilmiştir. Şekil 1'de üretim akım şeması verilen alümina-silika esaslı kompozit aerojel tozu için alümina kaynağı olan şamot tuğla harcı (20 g) ve silika kaynakları olan perlit, diatomit ve zeolit tozları (10 g), ayrı ayrı 100 ml'lik beher içerisinde 100 ml 3 M NaOH çözeltisinde 120°C'de 4 devir/dk karıştırma hızında 3 saat boyunca karıştırılarak çözüldürülmüştür. 3 saat sonra karışımdaki çözünmemiş kalıntılar 125 mm çaplı filtre kağıdı ile süzülerek ayrılmıştır. Filtre kağıdından süzülen karışım 3 molarlık HCl kullanılarak pH'ı yaklaşık 7'ye nötrleme işlemi yapılmıştır. 2 hafta oda sıcaklığında yaşlandırılan karışım sonrasında saf suda 1 hafta boyunca bekletilip süzülerek yapıdaki safsızlıklar (sodyum ve klorür tuzları) giderilmeye çalışılmıştır. Süzme işleminin ardından yaşlandırma sürecinde alümina-silika jeli hacimce %45 Etanol/saf su çözeltisinde 2 gün süreyle etüvde 60°C'de bekletilmiştir. Daha sonra süzülerek %100 Etanol içerisinde etüvde 60°C'de 5 gün bekletilerek yaşlandırma işlemi devam etmiş, sonrasında 120°C de 2 gün etüvde kurutma (atmosfer basıncında) işlemi yapılmıştır Şekil 2'de şamot tuğlası-perlit (H1), şamot tuğlası-diatomit (H2) ve şamot tuğlası-zeolit (H3) çözeltilerinin yaşlandırma sonrası elde edilen jellere ve üretilen tozlara ait makro görüntüler verilmiştir.



Şekil 1. Alümina-silika esaslı aerogel tozu üretim akış şeması  
(Alumina-silica based aerogel powder production flow chart)

### 2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Şamot tuğlası, perlit, diatomit ve zeolit başlangıç malzemesini içeren alümina-silika esaslı aerogel tozlarının özelliklerinin belirlenmesi için karakterizasyon işlemi uygulanmıştır. Alümina-silika aerogel tozlarının mikro yapısı, morfolojisi ve elementel analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS), faz yapıları X-ışını Kırınımı (XRD), yapıdaki bileşiklerin ve bağ türlerinin belirlenmesi için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri, spesifik yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı, Micromeritics Tristar II BET ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. BET yöntemi, analiz edilecek numune tabakasının tek bir moleküler yapı ile kaplanması için mevcut gaz miktarının belirlenmesi prensibine dayanır. Analiz işleminden önce numuneler degas ünitesine yerleştirilerek 300°C'ye kadar ısıtma yapılarak saflaştırılıp sudan arıtma işlemi yapılır ve ardından numuneler sıvı azot gazı kullanılarak analiz edilir. Aerogel tozlarının yoğunlukları ise  $0,9817 \text{ cm}^3$ 'lük hacme sahip bir kaptaki  $d=m/v$  formülü ile yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Termal iletkenlik katsayıları ise Hotdisk marka termal iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Termal iletkenlik katsayısı ölçümü için sentezlenmiş tozlar ölçüm kabına konularak 3,189 mm yarıçapa sahip olan prop, tozların arasına yerleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ortalama 25°C olup; ölçüm süresi 20 sn ayarlanmıştır.



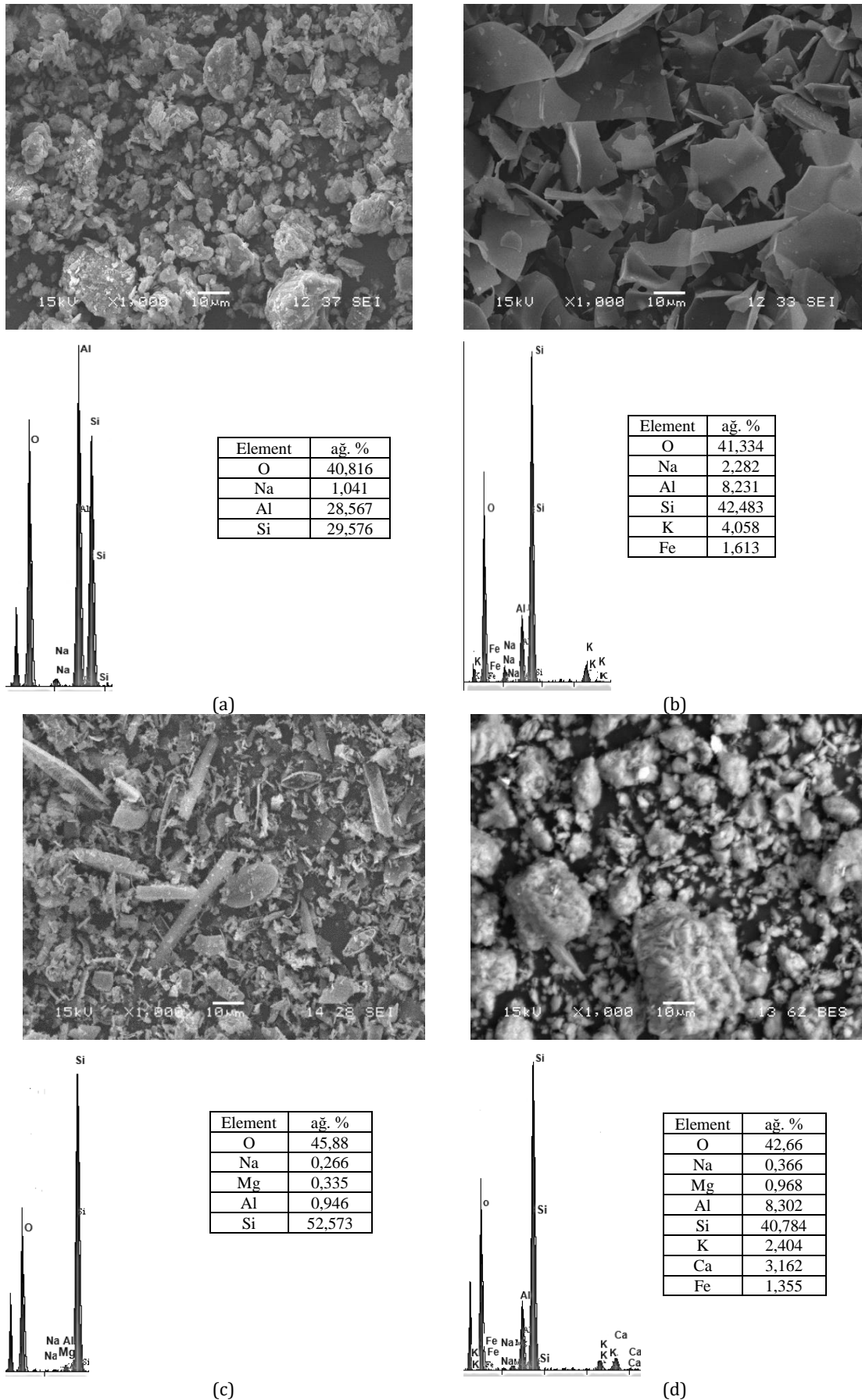
Şekil 2. Alümina-silika esaslı aerojel tozu eldesinde çözeltiyeye alma, jelleştirme ve kurutma aşamalarına ait makro görüntüler  
(Macro images of the dissolution, gelling and drying stages of alumina-silica based aerogel powder production)

### 3. Bulgular (Findings)

#### 3.1. Mikroyapı analizi (Microstructure analysis)

Başlangıç malzemeleri olarak kullanılan şamot tuğla harcı, perlit, diatomit ve zeolit tozlarına ve bu tozlardan elde edilen alümina-silika esaslı aerojel tozlarına ait SEM-EDS mikroyapı analiz görüntüleri incelenmiştir. Şekil 3'de şamot tuğla harcı, perlit, diatomit ve zeolit tozlarının 1000X büyütmede; Şekil 4'te şamot tuğlası-perlit (H1), şamot tuğlası-diatomit (H2) ve şamot tuğlası-zeolitten (H3) üretilen alümina-silika esaslı kompozit aerojel tozlarının 1000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM mikroyapı ve genel EDS analizleri verilmiştir.

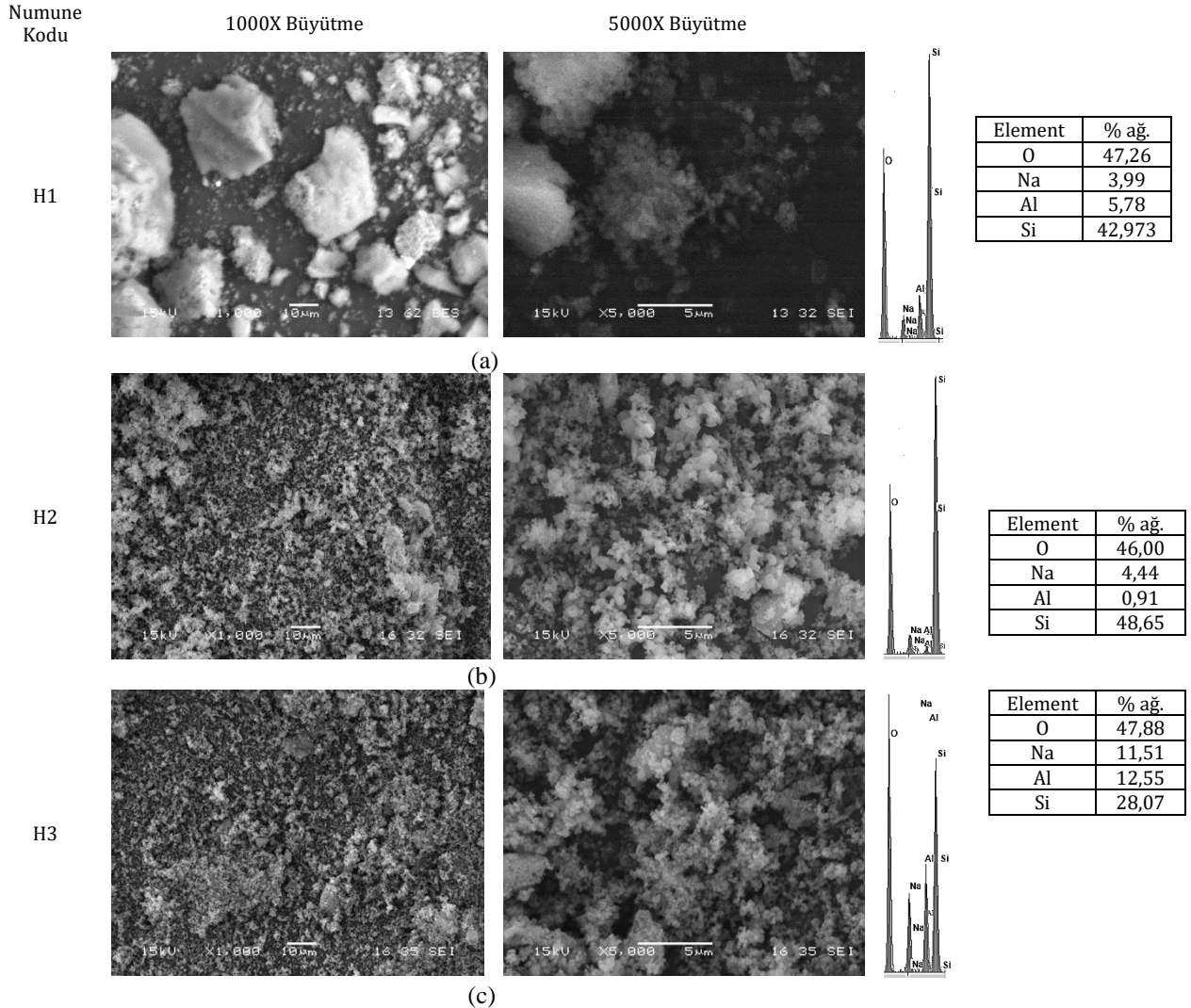




Şekil 3. a) Şamot tuğlası, b) Perlit, c) Diatomit ve d) Zeolite tozlarının 1000X büyütmedeki SEM-EDS Analizi (SEM-EDS Analysis of a) Chamotte brick, b) Perlite, c) Diatomite and d) Zeolite powders at 1000X magnification)



Şekil 3'de görüldüğü gibi, kullanılan hammadde kaynakları farklı miktarlarda alümina, silika ve safsızlıklar içermektedir ve her birinin mikroyapısı farklıdır. Şamot tuğlası tozlarının, geniş toz boyut aralığına sahip, birbirine yakın oranda Al (ağ. %28,567) ve Si (%29,576) içeriklerine sahip büyük ve küresel parçacıklardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Diatomit tozunun karışık toz morfolojisine (çubuksu ve plaka benzeri) sahip mikroyapı sergilediği ve büyük miktarda Si (%52,573) içerdiği gözlemlenirken; zeolit tozunun, yüksek Si içeriğine (%40,784) sahip, büyük ve aglomere olmuş parçacıklardan oluştuğu, perlit tozunun ise köşeli yaprak benzeri (plaka gibi) parçacık yapısına sahip olduğu ve aynı zamanda büyük miktarda Si (%42,483) içerdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4. a) Şamot tuğlası-perlit (H1), b) Şamot tuğlası-diatomit (H2) ve c) Şamot tuğlası-zeolit (H3) tozlarından üretilen alümina-silika aerojel tozlarının 1000X ve 5000X büyütmelerdeki SEM-EDS Analizi  
(SEM-EDS Analysis of alumina-silica aerojel powders produced from a) chamotte brick-perlite (H1), b) chamotte brick-diatomite (H2) and c) chamotte brick-zeolite (H3) powders at 1000X and 5000X magnifications)

Şekil 4'deki EDS sonuçlarından görüldüğü üzere silikanın en yüksek olduğu üretim şamot tuğlası ve diatomit öncülleriyle üretilen H2 kodlu aerojel tozunda görülmüş olup; alümina ve silika oranlarının birbirine en yakın olduğu numune ise şamot tuğlası ve zeolitten üretilen H3 kodlu aerojel tozu olmuştur. Mikroyapılarda görünen aglomerasyon (toz partiküllerinin ortam rutubetinden kaynaklı topaklaşması sorunu) (Şekil 5.'teki FTIR analizlerinde görülen belirgin -OH bağı ile de doğrulanmakta olup; üretilen diğer tozlarda da benzer durum görülmektedir), toz tane boyut aralığının geniş olması, nano boyutta tanelerin olması (BET analizi ile belirlenmiştir) ve mikropartiküllerin süngerimsi bir yapıya sahip olması, toz şekillerinin çoğunlukla küresel morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Ancak H1 kodlu numunede plaka benzeri toz tane yapılarının da olduğu gözlemlenirken, EDS analizlerinde alümina ve silika bileşimine ilave olarak baz (NaOH) çözeltisinden kaynaklı Na pikleri de tespit edilmiştir. Üretilen tozların sodyum içeriği, şamot tuğlası-perlit için yaklaşık ağırlık %3,99, şamot tuğlası-diatomit için %4,44 ve şamot tuğlası-zeolit için %11,51 olup; saf su ile yıkama sayısı artırılarak Na

miktarı yapıdan mümkün olduğunca giderilebilir. Zhu ve arkadaşlarının başlangıç malzemesi olarak kömür gangi kullanarak atmosfer basıncında kurutma sonucunda elde ettikleri  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  aerojellerin iskeletinin 50nm'den küçük nanopartiküllerden oluştuğu ve homojen, parçacıklar arası oluşan bağlantı kümelerinin birbirine bağlanmaları halinde sürekli oluşturulan bağlantı nedeniyle fazla sayıda gözenek oluştuğu gözlemlenmiştir [32]. Peng ve arkadaşları başlangıç malzemesi olarak alüminyum-sek-bütoksit ve tetraetilortosilikat (TEOS) kullanılarak çözelti değişimi olmadan sol-jel yöntemi ile süper kritik kurutma şartları altında (süper kritik etanol) alümina-silika aerojelleri sentezlemişlerdir. Yapılan çalışmada sunulan farklı şartlardaki numunelere ait SEM görüntülerinde tozların oldukça küçük homojen dağılmış nano parçacıklardan oluştuğu ve yüzey alanının artmasıyla gözenek boyutlarında iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir [33].

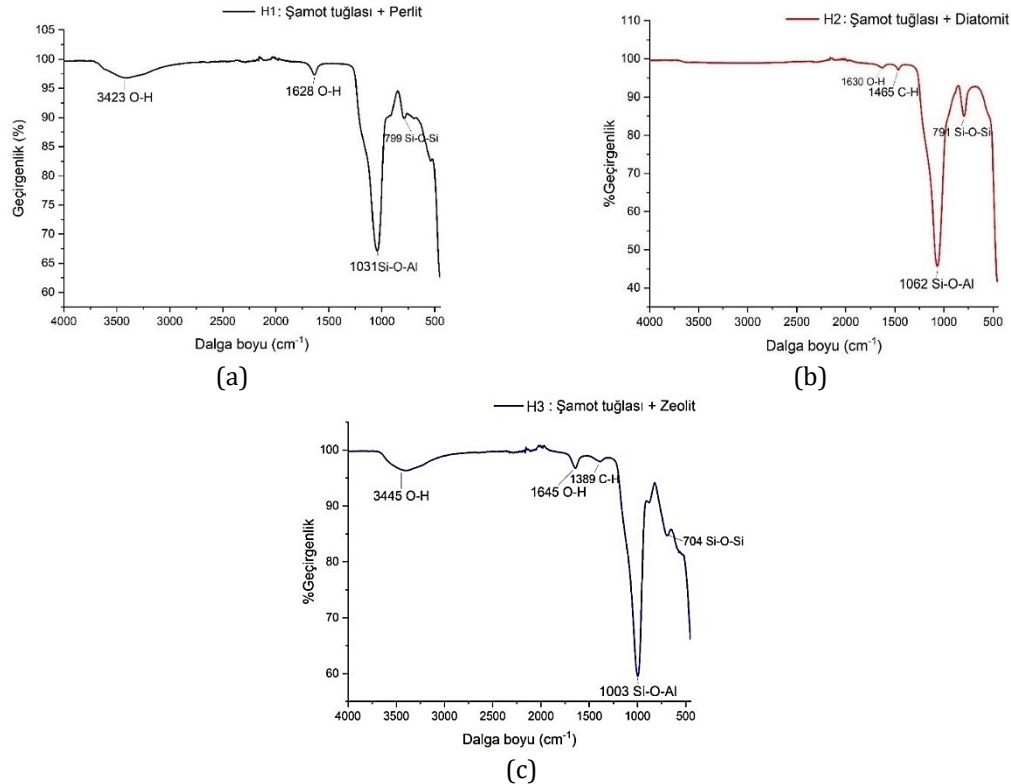
### 3.2. FTIR analizi (FTIR analysis)

Alümina kaynağı olarak şamot tuğla harcı ve silika kaynakları olarak perlit, diatomit ve zeolit kullanılarak üretilen alümina-silika esaslı kompozit aerjel tozlarının yapılarındaki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi sahibi olabilmek için FTIR analizi 450-4000  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de şamot tuğla harcı-perlit (H1), şamot tuğla harcı-diatomit (H2) ve şamot tuğla harcı-zeolitten (H3) üretilen aerjel tozlarına uygulanan FTIR analizi sonucunda elde edilen piklerin türü ve dalga boyuları verilmiştir.

Tablo 2. Alümina-silika aerjel tozlarının FTIR pik türleri ve dalga boyu değerleri (FTIR peak types and wavelength values of alumina-silica aerogel powders)

Numune kodları	Pikler			
	O-H	Si-O-Al	Si-O-Si	C-H
H1	~3423 $\text{cm}^{-1}$ ~1628 $\text{cm}^{-1}$	~1031 $\text{cm}^{-1}$	~799 $\text{cm}^{-1}$	-
H2	~1630 $\text{cm}^{-1}$	~1062 $\text{cm}^{-1}$	~791 $\text{cm}^{-1}$	~1465 $\text{cm}^{-1}$
H3	~3445 $\text{cm}^{-1}$ ~1645 $\text{cm}^{-1}$	~1003 $\text{cm}^{-1}$	~704 $\text{cm}^{-1}$	~1389 $\text{cm}^{-1}$

Şekil 5.a'da H1, Şekil 5.b'de H2 ve Şekil 5.c'de H3 kodlu aerjel tozlarına yapılan FTIR analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5. a) H1, b) H2 ve c) H3 kodlu aerjel tozlarının FTIR analizleri.  
(FTIR analysis of (a) H1, b) H2 and c) H3 coded aerogel powder)

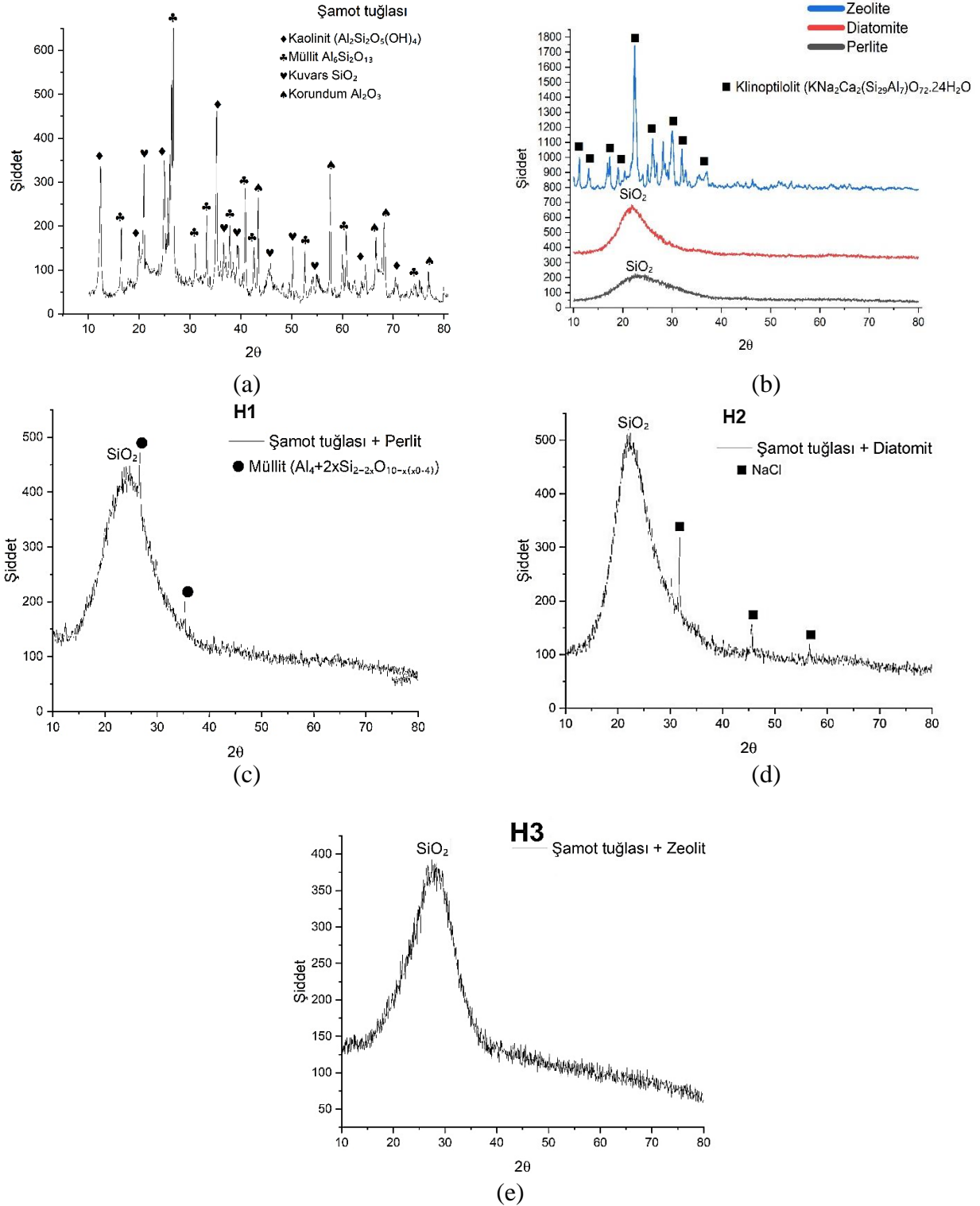
Şekil 5.a'da şamot tuğlası ve perlitten üretilen H1 kodlu numuneye yapılan FTIR analizi sonuçları

verilmiştir.  $\sim 799 \text{ cm}^{-1}$  bandı Si-O-Si asimetrik bağ gerilme titreşimi ile ilişkilidir. Si-O-Si asimetrik ve simetrik bağlar, bağ bükülmesi ve esneme titreşimi nedeniyle gözlenmektedir.  $\sim 3423 \text{ cm}^{-1}$  ve  $\sim 1628 \text{ cm}^{-1}$ 'de yüzeyde tutunan suyun fiziksel olarak adsorbe edilmesi nedeniyle -OH adsorpsiyon bağları oluşmuştur. H1 kodlu alümina-silika esaslı kompozit aerogel tozunda  $1031 \text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O-Al bağları tespit edilmiş olup; üretimin başarılı olduğu söylenebilmektedir. Şekil 5.b'de H2 kodlu aerogel tozunda  $1062 \text{ cm}^{-1}$ 'de güçlü ve belirgin Si-O-Al bağı,  $\sim 791 \text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O-Si asimetrik bağları, C-H bağları  $\sim 1465 \text{ cm}^{-1}$ 'de ve fiziksel olarak emilen su dolayısı ile  $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$ 'de -OH bağı oluşmuştur. Şekil 5.c.'de şamot tuğlası ve zeolitten üretilen H3 kodlu numuneye yapılan FTIR analizinde  $\sim 704 \text{ cm}^{-1}$ 'de asimetrik Si-O-Si bağlanmaları dolayısı ile belirgin ve güçlü pik,  $\sim 3445 \text{ cm}^{-1}$  ve  $\sim 1645 \text{ cm}^{-1}$ 'de fiziksel olarak emilen suyun gözeneklerin içerisine nüfuz etmesiyle -OH bağları ve  $\sim 1003 \text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O-Al bağı ve  $\sim 1389 \text{ cm}^{-1}$ 'de etanol modifikasyonuna ve adsorpsiyona bağlı olarak C-H pikleri oluştuğu belirlenmiştir. FTIR analizinde oluşan piklerin şiddeti bağların kuvvetli oluşu ile doğru orantılı olup Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarının kuvvetli olduğu yorumu yapılabilmektedir.

Lei ve arkadaşlarının yaptığı silika aerojellere nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozlarının katıldığı bir çalışmada  $880$  ve  $495 \text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler Al-O'nun titreşimine,  $1069 \text{ cm}^{-1}$ 'deki, Al-OH'ye,  $1074$ ,  $770$  ve  $479 \text{ cm}^{-1}$  civarındaki yoğun piklerin sırasıyla üç boyutlu Si-O-Si'nin asimetrik ve simetrik bağ gerilme ve bükülme titreşimlerine ait olduğu açıklanmıştır.  $968 \text{ cm}^{-1}$ 'deki pik, Si-OH gerilme titreşimine karşılık gelmektedir [6]. Wu ve arkadaşlarının yaptığı alümina katkılı silika aerojeller ile ilgili çalışmasında;  $3450$  ve  $1638 \text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler su adsorpsiyonunun (-OH) varlığını,  $1095 \text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş bant Si-O-Si'nin asimetrik gerilme titreşim pikine ve  $798$  ve  $466 \text{ cm}^{-1}$ 'deki bantlar Si-O-Si'nin simetrik gerilme titreşim pikine karşılık gelmektedir.  $400^\circ\text{C}$ 'nin altındaki  $2972$ ,  $2898$  ve  $1402 \text{ cm}^{-1}$  bantları hidrokarbon gruplarının Si- $\text{CH}_3$  titreşimini gösterdiği ve  $500^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki ısı işlem sonrasında kaybolduğu bildirilmiştir. Si-OH'nin bükülme titreşim pikine ilişkin olan  $955 \text{ cm}^{-1}$ 'deki bant, sıcaklığın artmasıyla kademeli olarak azalır ve  $800^\circ\text{C}$ 'deki ısı işleminden sonra tamamen kaybolmaktadır. Bu sonuç, önemli doğrusal büzülmeyle sonuçlanan Si-OH'nin dehidrasyon reaksiyonunu göstermektedir. Al-O-Al ve Al-OH bağları alüminanın nispeten düşük katkılama içeriği nedeniyle FTIR spektrumlarında gözlemlenmemiştir [7]. Wang ve arkadaşlarının diatomitten aerogel ürettikleri çalışmada  $2963 \text{ cm}^{-1}$ 'deki - $\text{CH}_3$  absorpsiyon piki ile  $847 \text{ cm}^{-1}$ 'de görülen Si-C piklerinin yüzey modifikasyonu için kullanılan trimetilklorosilan (TMCS) kaynaklı olduğu bildirilmiştir.  $1094 \text{ cm}^{-1}$  ve  $463 \text{ cm}^{-1}$ 'deki piklerin O-Si-O titreşimlerine,  $3448 \text{ cm}^{-1}$  ve  $1637 \text{ cm}^{-1}$ 'deki piklerin ise, -OH gruplarına ait olduğu gösterilmiştir [29]. Yu ve arkadaşlarının, tetraetoksisilan (TEOS) başlangıç malzemesi kullanarak alümina-silika aerogel sentezlemiş oldukları çalışmada, kalsinasyon sıcaklığı  $1000^\circ\text{C}$ 'yi aştığında mullit fazının oluşmaya başladığı görülmüştür. Silika birikiminin parçacıklar arasındaki viskoz akışı sınırlayabildiğini ve parçacıkların büyümesi ve iskeletin kabalaşması yoluyla iskelet mukavemetini artırabildiğini ve sistemde daha fazla Si-O-Al bağları oluşturarak  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'ün büyümesini sınırlayabildiğini göstermektedir. Saf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aerogeldeki  $880$ ,  $785$ ,  $619$  ve  $487 \text{ cm}^{-1}$  ve  $1164 \text{ cm}^{-1}$ 'deki zirveler sırasıyla boehmitin Al-O ve Al-O-H bağlarının titreşimlerini temsil etmektedir. Saf  $\text{SiO}_2$  aerogeldeki  $1085$ ,  $800$  ve  $465 \text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe noktaları Si-O-Si'nin asimetrik ve simetrik gerilmesini ve bükülmesini temsil ederken,  $1640$  ve  $960 \text{ cm}^{-1}$ 'deki tepeler Si-OH'nin gerilme titreşimini temsil etmektedir. Alümina-silika aerogel (ASA) ve silika katkılı alümina-silika aerogel (Si-ASA) numuneleri için,  $950$  ile  $1250 \text{ cm}^{-1}$  arasındaki geniş güçlü absorpsiyon piki, Si-O ve Si-O-Si'nin asimetrik gerilme titreşimlerine,  $1145$  ve  $1085 \text{ cm}^{-1}$ 'deki piklerden gelen katılara dayandırılmıştır. Si-O-Al bağları  $1039 \text{ cm}^{-1}$ 'de ve Si- $\text{CH}_3$  bağları ise  $1204 \text{ cm}^{-1}$ 'deki piklerde görülmüştür. Si-ASA'nın Al-O ve Al-O-H bağlarının absorpsiyon tepe yoğunluğunun ASA'ninkinden daha düşük ve Si-ASA'nın Si-O-Al bağlarının absorpsiyon pik yoğunluğu ASA'ninkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu, silikanın ASA'ya dahil edildiğini ve silika birikiminin Si-O-Al bağlarının miktarını artırabildiğini göstermektedir [34]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; mevcut çalışmada elde edilen verilerin literatürdeki verilerle benzerlik gösterdiği ve şamot tuğla harcı, perlit, diatomit ve zeolitten üretilen alümina-silika esaslı aerojellerde Si-O-Al bağ yapısının sağlandığı görülmüştür.

### 3.3. Faz analizi (Phase analysis)

Şamot tuğlası, perlit, diatomit ve zeolitten elde edilen numunelerin faz yapısını incelemek için XRD analizi  $\lambda=1,54056 \text{ nm}$  dalga boyunda  $\text{CuK}\alpha$  kullanılarak  $2^\circ/\text{dk}$  tarama hızı ve  $2\theta$  tarama açısı ise  $10\text{-}80^\circ$  aralığında gerçekleştirilmiştir. Hammadde olarak kullanılan şamot tuğlası, perlit ve diatomitin yanında bunlardan üretilen şamot tuğla harcı-perlit (H1) ve şamot tuğla harcı-diatomit (H2) ve şamot tuğla harcı-zeolit (H3) aerogel tozlarına uygulanan XRD analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. a) Şamot tuğla harcı ve b) perlit, diatomit, zeolit tozları ve c) şamot tuğla harcı-perlitten (H1), d) şamot tuğla harcı-diatomit (H2) ve e) şamot tuğla harcı-zeolitten (H3) üretilen aerjel tozlarına ait XRD analizi. (XRD analysis of aerogel powders produced from a) chamotte brick mortar and b) perlite, diatomite, zeolite and c) chamotte brick mortar-perlite, d) chamotte brick mortar-diatomite and e) chamotte brick mortar-zeolite)

Şamot tuğla harcı başlangıç malzemesine yapılan Şekil 6.a'da verilen XRD analizinde yapıda kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), müllit ( $\text{Al}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{13}$ ), kuvars ( $\text{SiO}_2$ ) ve korundum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) pikleri, perlit ve diatomit başlangıç malzemelerine yapılan analizde  $2\theta = 20-40^\circ$  aralığında geniş amorf ( $\text{SiO}_2$ ) pikleri görülürken, zeolitin yapısında klinoptilolit ( $\text{KNa}_2\text{Ca}_2(\text{Si}_{29}\text{Al}_7)\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ) fazına ait pikler belirlenmiştir. Üretilen tüm aerjel tozlarında  $\text{SiO}_2$  pikleri görülmüş olup, ek olarak şamot tuğlası-perlitten üretilen H1 kodlu tozda  $2\theta=35,299^\circ$ 'de müllit pikleri ve şamot tuğlası-diatomitten üretilen H2 kodlu aerjel tozunda  $2\theta=31,78, 45,56$  ve  $56,68^\circ$ 'lerde NaCl tuz pikleri görülmüştür. H2 kodlu numunenin jel miktarının fazla



olmasından dolayı yıkama işlemi ile tuz giderimi yetersiz olmuştur. Distile su ile yıkama işlem sayısının artırılması tuz giderimi için önemlidir. Wu ve arkadaşlarının [35] uçucu kül ve trona cevherinden silika aerjel ürettikleri çalışmada; XRD analizinde geniş amorf silika pikinin yanı sıra NaCl piki de gözlemlenmiştir. Zhu ve arkadaşlarının kömür gangından sentezledikleri alümina-silika aerjelin [32] XRD analizinde  $2\theta=25^\circ$  civarında amorf  $\text{SiO}_2$  piki,  $2\theta=30^\circ-80^\circ$  arasında ise  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pikleri görülmüştür. Literatürde yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığı zaman alümina-silika esaslı aerjellerin genel XRD sonuçlarına yakın sonuçlar elde edildiği, yapıda amorf yapının göstergesi olan geniş  $\text{SiO}_2$  piklerinin, müllit fazının (H1) ve NaCl piklerinin varlığı (H2) saptanmıştır.

### 3.4. BET analizi (BET analysis)

Doğal alümina ve silika kaynaklarından elde edilen alümina-silika esaslı aerjel tozlarının yüzey alanlarını, gözenek hacim ve boyutlarını ve partikül boyutlarını ölçmek için Micromeritics TriStar II cihazı kullanılarak tek noktalı BET analizi yapılmıştır. Şamot tuğlası ve perlitten elde edilen H1 kodlu alümina-silika esaslı aerjelde BET yüzey alanının  $248 \text{ m}^2/\text{g}$ , gözenek hacminin  $0,122 \text{ cm}^3/\text{g}$ , gözenek boyutunun ise  $19,648 \text{ \AA}$  ( $1,96 \text{ nm}$ ), H2 kodlu aerjel tozunun BET yüzey alanı  $13,356 \text{ m}^2/\text{g}$ , gözenek hacmi  $0,006416 \text{ cm}^3/\text{g}$ , gözenek boyutunun ise  $19,214 \text{ \AA}$  ( $1,92 \text{ nm}$ ) H3 kodlu aerjel tozunun ise yüzey alanı  $27,46 \text{ m}^2/\text{g}$ , gözenek hacmi  $0,01314 \text{ cm}^3/\text{g}$  ve gözenek boyutu  $19,146 \text{ \AA}$  ( $1,91 \text{ nm}$ ) olarak tespit edilmiştir ve dolayısıyla nanoboyutta, mikro gözenekli alümina-silika esaslı aerjel tozu üretilmiştir.

Lei ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada saf silika aerjelin yüzey alanı  $837 \text{ m}^2/\text{g}$  iken;  $1 \text{ gr Al}_2\text{O}_3$  toz ilavesi ile  $358,5 \text{ m}^2/\text{g}$  olmuştur. Ortalama gözenek boyutu ise saf silika aerjelde  $12,3 \text{ nm}$  iken  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozunun katkı miktarı arttıkça artmış olup;  $1 \text{ gr}$  ilavede  $22 \text{ nm}$  olmuştur [6]. Zhu ve arkadaşlarının kömür gangından silika aerjel ürettikleri çalışmada gözenek çapı  $20-60 \text{ nm}$  aralığında belirlenmiştir [31]. Wu ve arkadaşlarının uçucu kül ve trona cevheri kullanarak ürettikleri silika aerjelde mikro gözenek hacimlerinin ve BET özgül yüzeyinin önce arttığı, sonra azaldığı, ısı işlem sıcaklığı  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye yaklaştığında  $856,2 \text{ m}^2/\text{g}$  maksimum değere ulaştığı görülmüştür. BJH gözenek hacimleri de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik ısı işleminden sonra maksimuma yükselerek  $2,92 \text{ cm}^3/\text{g}$  olduğu görülmüştür. Bu değerlerin daha sonra azalması silika aerjel iskeletinin yüksek sıcaklıklar altında büzülmesine bağlanmıştır [35].

### 3.5. Yoğunluk analizi (Density analysis)

Aerjel tozlarının yoğunlukları ise  $0,9817 \text{ cm}^3$ 'lük hacme sahip bir kaptaki  $d=m/v$  formülasyonu ile yaklaşık olarak hesaplanmış olup; sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Şamot tuğlası-perlit, b) Şamot tuğlası-diatomit ve c) Şamot tuğlası-zeolit tozlarından üretilen alümina-silika aerjel tozlarının yoğunluk değerleri (Density values of alumina-silica aerjel powders produced from chamotte brick-perlite, b) chamotte brick-diatomite and c) chamotte brick-zeolite powders)

Numune Kodları	Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
H1	0,2565
H2	0,176
H3	0,2536

Tablo 3'te görüldüğü üzere şamot tuğla harcı ve diatomitten üretilen H2 kodlu aerjel tozunun yoğunluğu  $0,176 \text{ g}/\text{cm}^3$  olup diğer iki numuneye göre en düşüktür. EDS analizleri (Şekil 4) ile doğrulandığı üzere hem Na oranının diğerlerine göre daha düşük olması hem de silika oranının yüksek alümina oranının daha düşük olması sebebiyle (silikanın yoğunluğu < alüminanın yoğunluğu) yoğunluğunun da düşük olması beklenen bir durum olmuştur. Şamot tuğlası-perlit ve şamot tuğlası-zeolitten üretilen aerjel tozlarının yoğunlukları ise birbirine yakın olup sırasıyla  $0,2565 \text{ g}/\text{cm}^3$  ve  $0,2536 \text{ g}/\text{cm}^3$  olup; literatürdeki sonuçlarla uyumlu ve ideal bir aralıkta olduğu söylenebilmektedir.

Ji ve arkadaşlarının sol-jel yöntemi kullanarak alüminayla zenginleştirilmiş bir  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  aerjeli ürettikleri çalışmada öncül olarak ucuz bir inorganik alüminyum tuzu  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_9(\text{NO}_3)_3$  ve iskelet takviye maddesi olarak tetraetoksilan (TEOS) kullanılmıştır. Saf alümina aerjel numunenin yoğunluğu  $1,3$  iken Si/Al mol oranı  $0,5$  olanın  $0,3$ ,  $1$  olanın  $0,35$  ve  $3$  olanın  $0,5 \text{ g}/\text{cm}^3$  olmuştur [36]. Zhu ve arkadaşlarının doğal hammadde kaynağı olarak kömür gangi kullandıkları ve atmosferik şartlar altında kurutma yöntemi tercih ettikleri alümina-silika esaslı aerjel çalışmalarında ürettikleri aerjelin yoğunluğu  $0,3475 \text{ g}/\text{cm}^3$  olarak ölçülmüştür [32]. Literatürdeki çalışmalara kıyasla mevcut çalışmadaki yoğunluk değerinin sentetik kaynaklarla üretilen alümina-silika aerjellere göre daha



düşük (hafif) olması, hem maliyetin düşürülmesi hem de rezervi bol olan doğal hammadde kaynaklarının katma değerli bir ürüne dönüştürebilmesi ve hafifliğin önemli olduğu çeşitli alanlarla (yalıtım, sensör, katalizör taşıyıcısı vb.) kullanılma potansiyeli taşıması gibi avantajlar açısından önemli görülmektedir.

### 3.6. Termal iletkenlik analizi (Thermal conductivity analysis)

Termal özellikler ve diğer birçok malzeme özelliğinin yanı sıra maliyet açısından farklılık gösteren birçok yalıtım malzemesi türü mevcuttur. Aerojellerin nano ölçekli gözenek boyutundan dolayı normal sıcaklık ve basınçtaki termal iletkenliği, havanınkinden daha düşüktür ve bundan dolayı süper yalıtım malzemesi olarak bilinmektedir. Aerojel nano-gözenekli yalıtım malzemelerinin son derece düşük ısı iletkenliği, onların doğal karmaşık nanoyapılarından kaynaklanmaktadır. Nano gözenekli malzemelerin nanopartikülleri, karmaşık bir üç boyutlu ağ yapısı oluşturmak üzere birbirine bağlanan zincir iskeletleri oluşturmak üzere rastgele bir araya gelmektedir. Aerojellerin içindeki gözenek boyutu, gaz moleküllerinin ortalama serbest yolundan daha küçük veya buna yakınken; nano gözenekler, gaz moleküllerinin serbest hareketini ciddi şekilde kısıtlayacak ve gaz molekülleri arasındaki ısı transferini ciddi şekilde zayıflayacaktır. Ayrıca ısı katı iskelet üzerinden aktarıldığında, nano gözenekli yalıtım malzemelerinin karmaşık iskelet yapısı, ısı transfer yolunu arttırarak, nano gözenekli aerojel yalıtım malzemelerinin büyük termal direnç göstermesini sağlayacak dolayısıyla katı termal iletkenlik daha da düşecektir [37].

Sıcak disk (HD), Gustafsson probu veya Halldahl olarak da adlandırılan geçici düzlem kaynağı (TPS) tekniği, malzemelerin termal iletkenliğini ölçmek için uygun ve doğru bir yöntemdir. Hot disk AB tarafından üretilen sıcak disk (HD), bir numunenin termal iletkenlik, termal yayılma ve özgül ısı gibi termal aktarım özelliklerini ölçmek için tasarlanmış bir sistemdir. Genel olarak termal iletkenlik, yoğunluk, sıcaklık, nem içeriğinin yanı sıra yapılarında bulunan bileşenlere ve boşluklara da bağlıdır. TPS sensörü, birkaç eşmerkezli daireye sarılmış ve her iki tarafı da iyi kimyasal dirence ve mekanik özelliklere sahip ince bir polimerle kaplanmış bir şerit olarak kabul edilebilir. Eşmerkezli daireler çift sarmal şeklinde yapılmış, böylece akım bir uçtan diğer uca iletilebilir. TPS sensörü, test edilecek numune malzemenin iki parçası arasına yerleştirilir. Bu sensör hem numunenin sıcaklığını arttırmak için bir ısı kaynağı hem de zamana bağlı sıcaklık artışını kaydetmek için bir direnç termometresi görevi görmektedir. Belirlenmiş bir süre boyunca 200 direnç veri noktası alınır ve bunlardan sıcaklık ve zaman arasındaki ilişki kurulur. Sensörün başlangıçtaki termal kütle etkisi nedeniyle, genellikle ilk birkaç saniye boyunca kaydedilen veriler göz ardı edilir. Sıcak diskin ana avantajları doğruluk, geniş iletkenlik ölçümü aralığı, nispeten çok kısa bir sürede sonuçlar üretmesi ve farklı numune türlerini barındırmak için farklı sensör boyutları kullanabilmesidir [38]. Üretilen aerojel tozlarından elde edilen termal iletkenlik katsayısı değerleri kullanılan hammadde kaynaklarının termal iletkenlik katsayısı değerleriyle birlikte Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. H1, H2 kodlu aerojel tozlarının ve başlangıç hammaddelerinin termal iletkenlik değerleri (Thermal conductivity values of H1, H2 coded aerogel powders and precursor raw materials)

Hammaddeler ve Numune kodları	Termal iletkenlik katsayısı (W/mK)
Şamot tuğlası	0,1874
Perlit	0,0412
Diatomit	0,0687
Zeolit	0,1188
H1	0,0929
H2	0,0608
H3	0,0720

Elde edilen sonuçlarda başlangıç öncüllerinden olan şamot tuğlası, perlit, diatomit ve zeolitin termal iletkenlik katsayısı değerleri sırasıyla 0,1874, 0,0412, 0,0687 ve 0,1188 W/mK olduğu görülmüş olup; en düşük değere sahip olan perlit iken; en yüksek termal iletkenlik değeri zeolit hammaddesinde bulunmuştur. Şamot tuğlası ve perlitten üretilen aerojel tozu (H1) termal iletkenlik değeri 0,0929 W/mK, şamot tuğlası ve zeolitten üretilen aerojel tozunun ise (H3) 0,072 W/mK olduğu görülmüştür. Şamot tuğlası ve diatomitten üretilen Tablo 3'den de en düşük yoğunluklu olduğu görülen H2 kodlu aerojel tozunun termal iletkenliği 0,0608 W/mK olup bu değer oldukça düşük olduğu görülmüş ve ısı yalıtımında ısı yalıtım elemanı olarak kullanılmak için uygun değerde ve daha ucuz bir muadil olacağı söylenebilir.

Yu ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada fiber takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerojellerin termal iletkenliği, fiber

içeriğine bağlı olarak 0,0403 W/mK-0,0545 W/mK aralığında değiştiği görülmüştür [39]. Liu ve arkadaşlarının mullit fiber ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) takviyeli alümina aerjel üretimlerinde mullit fiber içeriğinin artmasıyla numunelerin yoğunluğunun 0,12 g/cm<sup>3</sup>'ten 0,33 g/cm<sup>3</sup>'e yükselmesiyle, oda sıcaklığında termal iletkenlik katsayısının da 0,032'den 0,050 W/m·K'e arttığı, dolayısıyla mullit fiber içeriği arttıkça aerjelin katı içeriği de arttığı için termal iletkenliğin artmasına neden olduğu açıklanmıştır [40]. Yu ve arkadaşlarının düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir kompozit yalıtım malzemesi olarak atmosferik şartlarda kurutma ile hazırladıkları kuvars elyaf/ $Al_2O_3$ - $SiO_2$  aerjellerde termal iletkenliğin oda sıcaklığında 0.049 W/mK olduğu görülmüştür [41].

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Mevcut çalışma sol-jel yöntemi ile silika kaynağı olarak perlit, diatomit ve zeolit alümina kaynağı olarak şamot tuğla harcı kullanarak ortam basıncında kurutma ile alümina-silika esaslı aerjel tozu üretimini ve üretilen tozların karakterizasyonunu kapsamaktadır.

- SEM analizi ile üç boyutlu ve gözenekli mikroyapıya sahip olması sebebiyle düşük yoğunluğa sahip olduğu, toz tane boyutunun nano seviyede olduğu, yüzeyin süngerli yapıya sahip olduğu gözlemlenmektedir. EDS analizi ile Si, Al ve O elementlerinin hakim olduğu gözlenmiştir.
- FTIR analizi ile asimetrik ve simetrik bağlanmadan dolayı belirgin ve güçlü Si-O-Al ve Si-O-Si piklerinin meydana geldiği, adsorbe edilen sudan kaynaklı ise -OH pikleri tespit edilmiştir.
- XRD analizi ile alümina-silika esaslı aerjellerin amorf yapının göstergesi olan geniş  $SiO_2$  piklerinin yanısıra müllit fazının varlığı da saptanmıştır.
- H1, H2 ve H3 kodlu alümina silika esaslı aerjelleri sırasıyla 248, 27,46 ve 13,356 m<sup>2</sup>/g gibi yüksek BET yüzey alanları, 0,122, 0,006416 ve 0,01314 cm<sup>3</sup>/g gözenek hacmi ve ~1,9 nm civarlarında ortalama gözenek boyutları gösterdiği görülmüştür.
- H1, H2 ve H3 kodlu alümina silika esaslı aerjellerin sırasıyla yoğunluk değerlerinin 0,2565, 0,176 ve 0,2536 g/cm<sup>3</sup> olduğu, termal iletkenlik değerlerinin ise H1, H2 ve H3 için sırasıyla 0,0929, 0,0608 ve 0,072 W/mK olduğu tespit edilmiş olup sonuçların literatürdeki çalışmalarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.
- Yapılan karakterizasyon testleri sonucunda literatürdeki alümina-silika esaslı aerjellere benzer sonuçlar elde edilmiştir. Böylece alümina kaynağı olarak şamot tuğla harcı, silika kaynakları olarak perlit, diatomit ve zeolit kullanılarak Si-O-Al bağ yapısında, amorf yapı göstergesi olan  $SiO_2$  piklerine sahip, nano boyutta alümina-silika aerjel tozları üretilebilmiştir. Mevcut proses etkili alümina-silika aerjel tozlarının üretimi için çok uygundur. Doğal silika ve alümina hammaddelerinden ortam basıncında kurutma yöntemiyle aerjel üretimi çok önemli ve birçok endüstriyel alan için faydalıdır. Alümina-silika aerjellerin pahalı kimyasalların yanısıra doğal hammadde ve atıklardan üretildiği ile ilgili literatürde çalışmalar mevcut olmakla birlikte; şamot tuğla harcı, perlit, diatomit ve zeolit kullanılarak üretilen aerjel çalışmalarına rastlanmamıştır.

#### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

#### Kaynaklar (References)

- [1] N. Saraç ve N. Toplan, "Dünyanın En Hafif Katı Malzemesi: Aerjeller," *Metal Dünyası Dergisi*, no. 276, pp. 68-72, Haziran 2016.
- [2] A. E. Çimen ve N. Toplan, "Döküm Kumu ve atık döküm kumundan silika esaslı aerjel toz eldesi," *Metal Dünyası Dergisi*, no. 329, pp. 50-56, Kasım 2020.
- [3] N. Saraç, "Silika esaslı doğal hammadde ve atıklardan aerjel tozu üretimi ve karakterizasyonu," Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2018.
- [4] A. Köken ve M. Kanık, "Aerjellerle Isı Yalıtımı ve Tekstil Uygulamaları," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 29, no. 128, pp. 249-260, 2022. doi: 10.7216/teksmuh.1222488
- [5] A. E. Çimen, "Döküm Kumu ve Atık Döküm Kumundan Silika Esaslı Aerjel Üretimi Ve Karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2021.
- [6] Y. Lei, X. Chen, H. Song, Z. Hu and B. Cao, "Improvement of thermal insulation performance of silica aerogels by  $Al_2O_3$  powders doping," *Ceramics International*, vol. 43, no. 14, pp. 10799-10804, 2017. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.100

- [7] Y. Wu, X. Wang, L. Liu, Z. Zhang and J. Shen, "Alumina-Doped Silica Aerogels for High-Temperature Thermal Insulation," *Gels*, vol. 7, no. 3, pp. 1-12, 2021. doi: 10.3390/gels7030122
- [8] C. M. Almeida, M.E. Ghica and L. Duraes, "An overview on alumina-silica-based aerogels," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 282, pp. 1-25, 2020. doi:10.1016/j.cis.2020.102189
- [9] D.C. Öz ve N. Kaya, "Sol-jel yöntemiyle üretilen alümina alkojelin fizikokimyasal ve yapısal özellikleri üzerine kurutma türünün etkisi", *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 3, pp. 657-669, 2020. doi:10.2339/politeknik.456871
- [10] S. Karamikamkar, H. E. Naguib and C. B. Park, "Advances in precursor system for silica-based aerogel production toward improved mechanical properties, customized morphology, and multifunctionality: A review," *Advances in colloid and interface science*, vol. 276, pp. 1-29, 2020. doi:10.1016/j.cis.2020.102101
- [11] D. C. Öz, B. Öz ve N. Kaya, "Alümina aerogellerin fiziksel özellikleri üzerine yaşlandırma ve kurutma süresinin etkisi," *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 1, pp. 198-211, Temmuz 2018. doi:10.25092/baunfbed.348344
- [12] A. Kochanke, C. Üffing and A. Hartwig, "Interaction of Poly (dimethylsiloxane) and octamethylcyclotetrasiloxane with aluminum oxides comprising different acid-base properties," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 161, pp. 19-29, 2019. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.01.
- [13] J. Estella, J. C. Echeverría, M. Laguna and J. J. Garrido, "Effects of aging and drying conditions on the structural and textural properties of silica gels," *Microporous and mesoporous materials*, vol. 102, no. 1-3, pp. 274-282, 2007. doi:10.1016/j.micromeso.2007.01.007.
- [14] A.S. Dorcheh and M. H. Abbasi, "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization," *Journal of materials processing technology*, vol. 199, no. 1-3, pp. 10-26, 2008. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
- [15] A. Kösematoğlu, "Yurdumuzdaki şamot ateş tuğlası hammadde yatakları," *Scientific Mining Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 98-109, 1961.
- [16] Vandersanden, "Malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü," *vandersanden.com*, June 8, 2021. [Online]. Available: <https://www.vandersanden.com/tr-tr/malzemelerin-yeniden-kullanimi-ve-geri-donusumu>. [Accessed: Jan. 12, 2024].
- [17] S. É. Elvanov and A. V. Belyakov, "Diatomite and its applications," *Glass & Ceramics*, vol. 65, 2008.
- [18] B. Taş ve M. Çetin, "Biyolojik orijinli tek doğal mineral: diyatomit," *Tübav Bilim Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 28-46, 2012.
- [19] N. Değirmenci ve A. Yılmaz, "Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 284-288, 2009.
- [20] M. V. Gökçe ve İ. Koç, "Diyatomit esaslı hafif yapı elemanı üretiminde üre-formaldehitin bağlayıcı olarak kullanılması," Doktora tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
- [21] Ü. Osman ve T. Uygunoğlu, "Diyatomitin hafif beton üretiminde kullanılması," *Teknik Dergi*, vol. 18, no. 86, pp. 4025-4034, 2007.
- [22] Pertaş, "Perlit madeni," *pertas.net*, Apr. 12, 2004. [Online]. Available: <http://www.pertas.net/Perlit.html>. [Accessed: Dec. 12, 2023]
- [23] Ł. Kotwica, W. Pichór, E. Kapeluszna and A. Różycka, "Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material," *Journal of Cleaner production*, vol. 140, pp. 1344-1352, Jan. 2017. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.018
- [24] E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, G. Malata, P. Murzyn and W. Nocuń-Wczelik, "The effect of highly reactive pozzolanic material on the early hydration of alite-C<sub>3</sub>A-gypsum synthetic cement systems," *Construction and Building Materials*, vol. 251, Aug. 2020. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118879
- [25] A. El Mir and S. G. Nehme, "Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 507-517, July 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.103
- [26] G. Jia, J. Guo and Z. Li, "Controllable preparation of aerogel/expanded perlite composite and its application in thermal insulation mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 394, Aug. 2023. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132257
- [27] M. Harila, "Biobased carbon aerogels incorporated with zeolite nanoplates for carbon dioxide adsorption," master dissertation, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2021.
- [28] K. A. Sashkina, P. A. Gurikov, A. B. Ayupov, I. Smirnova and E. V. Parkhomchuk, "Zeolite/silica aerogel composite monoliths and microspheres," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 263, pp. 106-112, June 2018. doi:10.1016/j.micromeso.2017.12.010
- [29] B. Wang, H. Ma and K. Song, "Preparation and characterization of silica aerogels from diatomite via ambient pressure drying," *Russian Journal of Physical Chemistry A*, vol. 88, pp. 1196-1201, June 2014. doi:10.1134/S0036024414070036
- [30] W. Hu, M. Li, W. Chen, N. Zhang, B. Li, M. Wang and Z. Zhao, "Preparation of hydrophobic silica aerogel with kaolin dried at ambient pressure," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 501, pp. 83-91, July 2016. doi:10.1016/j.colsurfa.2016.04.059

- [31] P. Zhu, M. Zheng, S. Zhao, J. Wu and H. Xu, "Synthesis and thermal insulation performance of silica aerogel from recycled coal gangue by means of ambient pressure drying," *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 30, no. 5, ss. 908-913, Oct. 2015. doi:10.1007/s11595-015-1248-9
- [32] J. Zhu, S. Guo and X. Li, "Facile preparation of a SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aerogel using coal gangue as a raw material via an ambient pressure drying method and its application in organic solvent adsorption," *RSC Advances*, vol. 5, no. 125, pp. 103656-103661, Nov. 2015. doi:10.1039/C5RA20392A.
- [33] F. Peng, Y. Jiang, J. Feng, L. Li, H. Cai and J. Feng, "A facile method to fabricate monolithic alumina-silica aerogels with high surface areas and good mechanical properties," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 6, pp. 2480-2488, June 2020. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2020.01.058
- [34] F. Lou, S. Dong, K. Zhu, X. Chen and Y. Ma, "Thermal insulation performance of aerogel nano-porous materials: characterization and test methods," *Gels*, vol. 9, no. 3, March 2023. doi:10.3390/gels9030220
- [35] X. Wu, M. Fan, J. F. McLaughlin, X. Shen and G. Tan, "A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique," *Powder Technology*, vol. 323, pp. 310-322, Jan. 2018. doi:10.1016/j.powtec.2017.10.022
- [36] X. Ji, Q. Zhou, G. Qiu, B. Peng, M. Guo and M. Zhang, "Synthesis of an alumina enriched Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogel: Reinforcement and ambient pressure drying," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 471, pp. 160-168, Sept. 2017. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.038
- [37] F. Lou, S. Dong, K. Zhu, X. Chen, and Y. Ma, "Thermal insulation performance of aerogel nano-porous materials: characterization and test methods," *Gels*, vol. 9, no. 3, March 2023. doi:10.3390/gels9030220
- [38] S. A. Al-Ajlan, "Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique," *Applied thermal engineering*, vol. 26, no. 17-18, pp. 2184-2191, 2006. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.04.006
- [39] Y. Yu, K. Peng, J. Fang, R. Zhang, G. Wang and X. Peng, "Mechanical and thermal conductive properties of fiber-reinforced silica-alumina aerogels," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 1138-1145, March 2018. doi:10.1111/ijac.12891
- [40] L. Liu, X. Wang, Z. Zhang, Y. Shi, Y. Zhao, S. Shen and J. Shen, "A facile method for fabricating a monolithic mullite fiber-reinforced alumina aerogel with excellent mechanical and thermal properties." *Gels*, vol. 8, no. 6, June 2022. doi:10.3390/gels8060380
- [41] H. Yu, Y. Jiang, Y. Lu, X. Li, H. Zhao, Y. Ji and M. Wang, "Quartz fiber reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> aerogel composite with highly thermal stability by ambient pressure drying," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 505, pp. 79-86, Feb. 2019. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.10.039

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## A Review of Studies Evaluating Students' Academic Performance with Machine Learning Techniques

Sema Kayalı<sup>a</sup>, Serkan Savaş<sup>\*b</sup>

Submitted: 21.04.2024 Revised: 13.07.2024 Accepted: 09.10.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR09

### ABSTRACT

**Keywords:** Artificial intelligence in education, academic achievement, student performance, machine learning, attribute selection

<sup>a</sup> Çankırı Karatekin University,  
Graduate School of Natural and Applied  
Sciences,  
Dept. of Electronics and Computer  
Engineering  
18200 - Çankırı, Türkiye  
Orcid: 0009-0005-3949-0021  
e mail: semakanis@gmail.com

<sup>b</sup> Kırıkkale University,  
Engineering and Natural Sciences Faculty,  
Dept. of Computer Engineering  
71450 - Kırıkkale, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3440-6271

\*Corresponding author:  
serkansavas@kku.edu.tr

The application of machine learning in educational technologies is increasingly prevalent, supporting personalized learning and enhancing student performance. This study examines prominent methods and models in the literature for predicting or classifying students' academic achievements. Research conducted over the past 15 years was analyzed, focusing on algorithms, feature selection techniques, and evaluation metrics, which were statistically assessed. The analysis of the 10 most successful models is presented along with feature selection techniques and classification algorithms. Algorithms such as Artificial Neural Networks, Logistic Regression, Random Forest, and K-Nearest Neighbors demonstrated high accuracy rates. Information Gain emerged as the most frequently used feature selection technique, while Naive Bayes was identified as the most common classification algorithm. Key factors influencing student performance include parental education level, the quality of prior education, and family income. This study provides a comprehensive overview of the literature and serves as a reference point for future research in the field.

## Öğrencilerin Akademik Performanslarını Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Değerlendiren Çalışmaların İncelenmesi

### ÖZ

Makine öğrenmesi, eğitim teknolojilerinde bireyselleştirilmiş öğrenmeyi desteklemek ve öğrenci başarısını artırmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, öğrencilerin akademik başarılarının tahmin edilmesi veya sınıflandırılması üzerine literatürdeki önde gelen yöntemler ve modeller incelenmiştir. Son 15 yılda yapılan araştırmalar analiz edilerek kullanılan algoritmalar, öznitelik seçim teknikleri ve ölçüm metrikleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada En başarılı 10 modelin analizi, öznitelik seçim teknikleri ve sınıflandırma algoritmalarıyla birlikte sunulmuştur. Yapay Sinir Ağları, Lojistik Regresyon, Rastgele Orman ve K-En Yakın Komşu gibi algoritmalar yüksek başarı oranlarıyla öne çıkmıştır. En sık tercih edilen öznitelik seçim tekniği Bilgi Kazancı, sınıflandırma algoritması ise Naive Bayes olmuştur. Öğrenci başarısını etkileyen temel faktörler arasında ebeveynlerin eğitim düzeyi, önceki eğitim kalitesi ve aile gelir düzeyi yer almaktadır. Çalışma, literatüre kapsamlı bir bakış sunarken, ileride yapılacak araştırmalar için bir rehber niteliğindedir.

**Anahtar Kelimeler:** Eğitimde yapay zeka, akademik başarı, öğrenci performansı, makine öğrenmesi, öznitelik seçimi



## 1. Giriş (Introduction)

Eğitim, bir ülkenin kalkınması, insanların daha iyi bir hayat sürdürebilmeleri ve bireylerin üretken olması için zorunludur. Eğitimde akademik başarının artırılması okul idaresi, öğretmen, öğrenci ve veli açısından her zaman istenilen bir durumdur. Eğitim öğretim sürecinin içerisindeki paydaşlar (veli, öğrenci, okul yönetimi ve öğretmen), geçmişten günümüze birçok sorunla karşılaşmıştır. Bu sorunlar öğrencilerin akademik başarılarını olumlu veya olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı sınıf içinde eğitim gören öğrencilerin ailelerinin kültürel yapıları ve öğrencilerin farklı yaşam şekilleri bunlara örnek gösterilebilir. Öğrencilerin öğrenme ve bilgi edinme yolları birbirinden farklıdır. Aynı sınıftaki öğrencilerin akademik başarılarının birbirinden farklı olması bu durumu doğrulamaktadır [1].

Veri madenciliği ile büyük verilerin işlenerek anlamlandırılmasında büyük başarılar elde edilmektedir. Bu sebeple son zamanlarda veri madenciliği büyük önem kazanmıştır. Sağlık, ekonomi, iletişim, bankacılık hizmetleri, ulaşım ve eğitim-öğretim gibi pek çok sektörde karşılaşılan problemlere çözüm üretmek için gerekli tahminleri yapmaktadır [2-4]. Veri madenciliği uygulamalarının eğitim alanında yapılan çalışmalarına eğitsel veri madenciliği denmektedir. Bu çalışmalar ile eğitim sisteminde kalite ve verimliliği arttırmak, eğitim ile ilgili konuları analiz etmek ve eğitim süreçlerini iyileştirmek istenmektedir. Eğitsel veri madenciliği, eğitimdeki farklı paydaşlara (öğrenciler, öğretmenler, yöneticiler ve politika yapımcılar) önemli bilgiler sunarak, eğitim sisteminin genel performansını ve verimliliğini artırabilir. Bu uygulamalar sayesinde, eğitimin her aşamasında daha bilinçli kararlar alınabilir, kaynaklar daha verimli kullanılabilir ve öğrenci başarısı daha sürdürülebilir hale gelebilir. Teknolojinin eğitime entegrasyonu ile, bireysel öğrenme hızlarına ve kapasitelerine göre uyarlanmış eğitim programları geliştirilebilir ve böylece öğrencilerin başarısızlık oranları azaltılabilir [5-7]. Ülkemizin eğitim sisteminde rekabetçi bir ortam bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile eğitim kurumları, akademik gelişim için eğitsel veri madenciliği araçlarının ve tekniklerinin kullanımına giderek daha fazla önem vermektedirler. Bu sayede uygulanan eğitim programlarının başarıyı nasıl etkilediği tespit edilebilir. Programların etkilerinin önceden bilinmesi, gelecekte uygulanacak yeni eğitim modellerinin daha yararlı bir şekilde uygulanmasına imkân tanır. Eğitim sürecinin doğru bir şekilde planlanması ve yürütülmesi hem öğrenci hem de eğitmen için akademik başarıyı artıracaktır [8-10]. Makine öğrenmesi yöntemleri ile öğrenci başarısını artırmaya yönelik akademik başarı sınıflandırması ve tahmini oldukça popüler hale gelmiştir. Öğrencilerin bireysel ihtiyaçlarını ve öğrenme stillerini anlamaya yardımcı olan bu yöntemler, öğrencilere kişiselleştirilmiş eğitim deneyimleri sunarak onların potansiyellerini maksimize etmeyi hedefler. Ayrıca, öğrenci verilerinin analizi ile zorluk çekilen konular ve alanlar belirlenebilir, bu da öğretim stratejilerinin daha hedefli ve etkili bir şekilde oluşturulmasına imkan tanır [11].

Makine öğrenmesi istatistik ve matematik bilimlerinden yararlanılarak geliştirilen bütünleştirme ve sorun çözme becerileri açısından çok yararlı ve seçenekli bir çalışma yöntemidir [12]. Bilgisayar yazılımlarıyla çeşitli ortamlarda makineler eğitilerek otomatik bir şekilde problemlerin algılanması ve sonucunda çözüm üretilmesi sağlanır. Makine öğrenmesi ile geliştirilen sistemler, gelecek için öngörülerde bulunarak karar alma süreçlerine olumlu katkılar sağlayarak insan yaşamını kolaylaştırmaktadır. Bu sebeple bu çalışmanın amacı, öğrencilerin akademik başarısının farklı makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların kapsamlı olarak araştırılması ve bir araya getirilmesidir. Çalışmalarda kullanılan teknikler, başarımlar, bulgular ve katkılar da sunulmuştur. Bu araştırmanın, sonraki çalışmalar için bir temel oluşturması amaçlanmaktadır.

Literatürde öğrencilerin akademik başarılarının sınıflandırılmasına yönelik ulusal ve uluslararası çok sayıda çalışma vardır. Fakat bu çalışmaların yöntem ve teknikleri, sonuçları ve stratejileri açısından incelenmesi zorluğu tüm araştırmacılar için baş edilmesi gereken bir problemdir. Bu araştırma, bu problemin giderilmesi için önemli sonuçlar sunmaktadır. Akademik performansla ilgili literatürü incelemek için daha önce yapılmış bazı çalışmalar vardır ancak bunların çoğu genel literatür incelemeleridir ve genel öğrenci performans tahminine yöneliktir [13-15]. Bu çalışmada makine öğrenmesi alanındaki en iyi uygulamalar toplanarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sadece makine öğrenmesi teknikleriyle performans tahminine yönelik araştırmalar değil bu araştırmalar içerisinde öznitelik seçim teknikleri kullanılarak daha etkili sonuçlar üretmeyi amaçlayan literatür incelenmiştir.

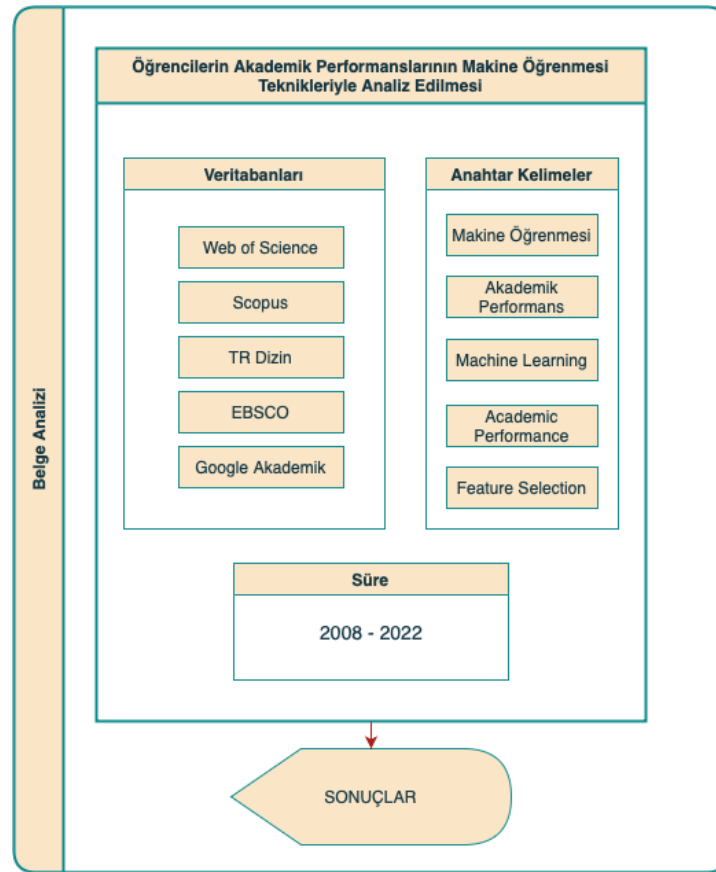
Bu çalışmanın ikinci bölümünde araştırma için uygulanan strateji belirtilmiştir. Üçüncü bölüm olan bulgular bölümünde akademik başarı tahmini veya sınıflandırmasında kullanılan farklı makine öğrenmesi algoritmaları ve öznitelik seçme yöntemlerinin literatürde bulunan benzer çalışmalarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümünde, çalışmada özetlenen araştırmalar bir tablo halinde sunulmuş ve araştırmaların

kapsamlarına yönelik istatistik bilgileri tartışılmıştır. Sonuç bölümünde ise çalışmaya ait sonuçlar ve daha sonraki çalışmalara yönelik öneriler belirtilmiştir.

## 2. Uygulanan Strateji (Implemented Strategy)

Araştırma stratejisi, sistematik süreçler ve araçlar kullanarak veri toplamak ve analiz etmek olarak belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen veriler farklı akademik veri tabanlarında yayınlanan makine öğrenmesi ve akademik performans değerlendirme çalışmalarını içermektedir. Mevcut çalışma, bu verileri analiz ederek, bu yayınların kapsam ve sonuçlarını araştırarak dünya genelinde öğrencilerin akademik başarılarının makine öğrenmesiyle değerlendirilmesi alanında atılan adımları incelemeyi ve tespit etmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede eğitim öğretim uygulamalarında yapay zekâ teknolojilerinin etkin kullanımının sağlanması için atılması gereken adımlar, tespit edilen eksiklikler ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar konusunda bir durum tespiti çalışması yapılmıştır.

Bu çalışmada nitel araştırma yöntemlerinden biri olan betimsel araştırma modeli kullanılmıştır. Araştırma felsefesi açısından temel bir araştırma modeli, uygulama yöntemi açısından ise kütüphane, arşiv, müze ve internet gibi mevcut kaynaklardan derlenen verilere (metin, resim vb.) dayalı bir belge araştırma modeli oluşturulmuştur [16]. Çalışmada kullanılan araştırma modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Araştırma Modeli  
(Research Model)

Çalışmada kullanılan araştırma modeli Web of Science (WoS), Scopus, EBSCO, Google Scholar ve TR Dizin'den elde edilen çalışmalardan oluşmaktadır. Araştırmada kullanılan çalışmalar akademik veri tabanlarına kaydedilmiş ve araştırma konusuna göre sınıflandırılmıştır. Belirlenen anahtar kelimeler kullanılarak veri tabanlarından 2008-2022 yılları arasında, 15 yıllık süreçte gerçekleştirilen makine öğrenmesi ve akademik performans değerlendirme ile ilgili çalışmalar taranmıştır. Elde edilen çalışmalar araştırma konusuna göre ve daha sonra tarihsel sıraya göre düzenlenmiştir. Bu çalışmalar şöyle sınıflandırılmıştır:

- Yazar
- Çalışma Türü

- Veri Seti
- Öznitelik Seçim Teknikleri
- Yöntemler
- Kullanılan Araçlar
- Değerlendirme Ölçütleri

Araştırma kapsamında belirlenen veri tabanlarındaki makale, konferans bildirileri ve tez çalışmaları incelenmiş kitap veya kitap bölümü taraması gerçekleştirilmemiştir. Araştırmalar hem Türkçe hem de İngilizce anahtar kelimelerle yapılmış ve çalışma dilleri olarak da Türkçe ve İngilizce çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca farklı veri tabanlarından elde edilen aynı yayınlar olmuştur ancak çiftleme yayınlara rastlanılmamıştır. Araştırma gerçekleştirilirken anahtar kelimeler birlikte kullanılmıştır. Örneğin makine öğrenmesi anahtar kelimesi tek başına kullanıldığında çok farklı sonuçlar getirebilecekken, bu anahtar kelime akademik performans anahtar kelimesi ile kullanıldığında sonuçlar daraltılarak hedefe yönelik çalışmalara ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle anahtar kelimeler birlikte kullanılarak tarama gerçekleştirilmiştir.

### 3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Literatürde öğrenci performansını sınıflandırma ve tahminleme üzerine makine öğrenmesi alanında farklı çalışmalar yapılmıştır. Literatür araştırmasında incelenen yayınlara ait detaylar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İncelenen çalışmalara ait anahtar bilgiler (Key information about the studies reviewed)

Yazar	Çalışma Türü	Veri Seti	Öznitelik Seçim Teknikleri	Yöntemler	Kullanılan Araçlar	Değerlendirme Ölçütleri
[17]	Makale	578 kayıt 12 öznitelik	Yok	Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi YSA (%94.43)	Rapid Miner	Doğruluk oranı Mutlak hata yüzdesi
[18]	Makale	421 kayıt 29 öznitelik	IG	YSA (%98.6) KNN, LR, SVM, DT, RF, NB	Orange	Doğruluk oranı Karışıklık matrisi ROC eğrisi
[19]	Makale	497 kayıt 9 öznitelik	Yok	DT, NB Kural Tabanlı (%71.3)	WEKA	Doğruluk oranı
[20]	Makale	300 kayıt 24 öznitelik	CFS, GR, IG, SU	J48, PART RF (%99) BayesNet	WEKA	Doğruluk oranı
[21]	Bildiri	56.000 kayıt 34 öznitelik	IG	DT, RF (%75.52), GBT, DL, NB, LR, GLM	Rapid Miner	Doğruluk oranı
[22]	Makale	17 öznitelik	Yok	GBM (%99)	Belirtilmemiş	ROC eğrisi
[23]	Bildiri	429.757 kayıt 11 öznitelik	Özellik seçimi kullanılmış fakat yöntem adı belirtilmemiş	C5.0 (%82.1), CHAID, LR, YSA, CART, QUEST	SPSS Clementine	Doğruluk oranı
[24]	Makale	44 öznitelik	IG Chi-Square MI MICHI	KNN Hibrit C5.0 RF (99.98) Improved Deep Belief Networks	R	Doğruluk oranı
[25]	Makale	2.039 kayıt	Özellik seçimi kullanılmış fakat yöntem adı belirtilmemiş	LR NB YSA (%79) KA		Doğruluk oranı
[26]	Makale	2.850 Kayıt 33 öznitelik	IG BFS Genetik algoritma	KNN, KA, NB, Derin Öğrenme (%97.7)	Rapid Miner	Doğruluk oranı
[27]	Makale	Belirtilmemiş	Yok	NB, KNN, KA, RF, DVM, LR, YSA (%89.84)	Belirtilmemiş	Doğruluk oranı

Tablo 1. Devamı (Contuniuue)

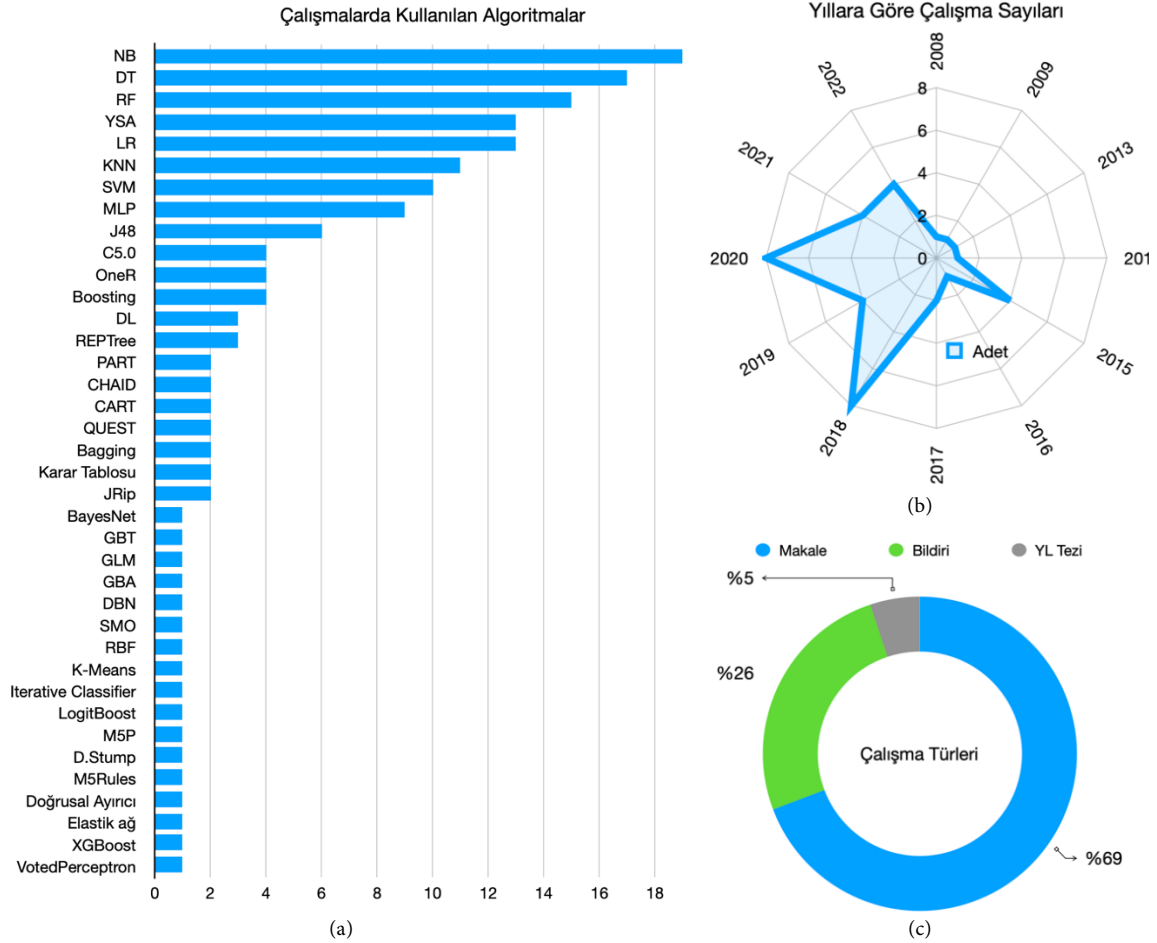
[28]	Makale	152 kayıt	Chi-Square IG SU ReliefF	MLP (%75), NB, SMO, J48, REPTree	WEKA	Doğruluk oranı
[29]	Makale	195.584 kayıt	Yok	YSA+MLP (%85) RBF	Belirtilmemi ş	Korelasyon katsayıları Doğruluk oranı
[30]	Makale	5.358 kayıt 8 öznitelik	Yok	K-Means C5.0 CART (%85) CHAID QUEST	SPSS Clementine	Kümeleme analizi Doğruluk oranı
[31]	Makale	3.775 kayıt	ANOVA	Kümeleme an. Gruplama yöntemi Regresyon Korelasyon teknikleri	Orange D-melt SPSS	Kümeleme analizi Gruplama yöntemi Regresyon
[32]	Makale	395 Kayıt 33 öznitelik	Yok	Iterative Classifier OneR (%92.15) LogitBoost YSA	WEKA	Duyarlılık Özgünlük Doğruluk oranı ROC eğrisi
[33]	Makale	5820 Kayıt 34 öznitelik	Yok	LR (%84.1)	Belirtilmemi ş	Doğruluk oranı Karışıklık matrisi
[34]	Bildiri	1.000 Kayıt 8 Öznitelik	Rastgele n- sınıfı ANOVA Select k-best	SVM (%72)	Jupiter Notebook (Python)	Doğruluk Oranı
[35]	Makale	1.395 kayıt 27 öznitelik	CFS	LR (%62-65), NB, SVM, KNN, RF, Bagging, MLP	WEKA	Doğruluk oranı
[36]	Makale	480 Kayıt 17 öznitelik	Hiper parametre seçimi; Izgara araması (%82.3)	KNN SVM AutoML (DRF) (%77.5 - %82.30)	H2O AutoML (Python)	Doğruluk oranı F-skoru RMSE MSE
[37]	Makale	3.794 Kayıt 13 öznitelik	Yok	YSA, M5P, D.Stump, M5Rules, DT, Bagging	WEKA	MSE Korelasyon katsayısı
[38]	Bildiri	1.044 Kayıt 33 öznitelik	CAE IGAE GRAE	NB, RF, J48, MLP, Karar Tablosu (%76.11), JRip, LR	WEKA	Doğruluk oranı
[39]	Bildiri	500 Kayıt 16 öznitelik	Belirtilmemiş	LR SVM (%78)	WEKA Jupyter Notebook	Doğruluk Kesinlik Duyarlılık F-skoru Karışıklık matrisi
[40]	Makale	395 Kayıt 33 öznitelik 650 kayıt 52 öznitelik	Özellik seçimi var	Hibrid (1. veri seti %90 ve 2. veri seti %85) (Kümeleme + sınıflandırma)		Doğruluk Kesinlik Duyarlılık F-skoru Karışıklık matrisi
[41]	Makale	-	Sarmalayıcı öznitelik seçimi	KNN (%92 - 2. veri seti), DT, NB (%87 - 1. veri seti), SVM, Doğrusal Ayırıcı	MATLAB	Doğruluk oranı
[42]	Makale	38 öznitelik	Özellik seçimi var	NB (%86) MLP C4.5 (J48)	WEKA	Doğruluk oranı
[43]	Bildiri	500 kayıt	Select K-Best	LR, NB, DT, Boosting (%75) RF	Python	Doğruluk oranı

Tablo 1. Devamı (Contunue)

[44]	Makale	3.225 Kayıt 57 öznitelik	CFS FSA IG Relief	LR (%90) Elastik ağ reg. (%90) RF XGBoost	R	Doğruluk oranı
[45]	Makale	1.044 Kayıt 33 öznitelik	Filtreleme Özyinelemeli özellik çıkarma metotları	YSA (%87.9-%97.6)	Python	Doğruluk Kesinlik Duyarlılık F-skoru Karışıklık matrisi
[46]	Bildiri	395 kayıt 33 öznitelik	Yok	C5.0, Boosted- C5, Regresyon Ağaçları, SVM, LR, RF Derin Ö. (%87)	R	Doğruluk oranı
[47]	Bildiri	6.882 Kayıt 15 öznitelik	mRMR Genetik algoritma SVM, IG	KNN (%91.12) DT NB YSA	RapidMiner	Doğruluk oranı
[48]	Yüksek Lisans Tezi	458 Kayıt 79 öznitelik	C4.5 CFS	C4.5 MLP KNN SVM (%85.5)	WEKA	Doğruluk Kesinlik Duyarlılık F-skoru Kappa değeri
[49]	Makale	1.044 Kayıt 33 öznitelik	CFS GR IG	NB, RF, DT, MLP, Karar Tablosu (%83.33)	MS SQL	Doğruluk F-skoru ROC eğrisi
[50]	Makale	1.969 kayıt 32 öznitelik	CFS Chi-Square GR IG Relief SU	VotedPerceptron NB OneR (%89) PART	WEKA	Doğruluk F-skoru ROC eğrisi
[51]	Bildiri	480 kayıt 16 öznitelik		MLP, DT, RF, OneR, NB, YSA (%79.1)	WEKA	Doğruluk Kesinlik Duyarlılık F-skoru Karışıklık matrisi
[52]	Yüksek Lisans Tezi	127 kayıt 49 öznitelik	Yok	YSA DT	MATLAB	Korelasyon katsayısı OKH, OMH
[53]	Makale	500 Kayıt 16 öznitelik 300 kayıt 24 öznitelik	Chi-Square CFS GR Ana Bileşenler Relief	MLP (%77), NB, DT, J48, RF, MLP, SL, OneR, Jrip, REPTree	WEKA	Doğruluk oranı
[54]	Makale	413 kayıt 34 öznitelik	Öznitelik seçimi yapılmış	NB DT MLP KNN	Belirtilmemi ş	Doğruluk oranı
[55]	Bildiri	1.044 kayıt 32 öznitelik	-	DT SVM RF YSA	R	Doğruluk oranı Karışıklık matrisi

Tablo 1’de sunulan öznitelik seçme ve çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerini birleştirerek tahmin yapan çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalara ait istatistiksel bilgiler özetlenmiştir. Yıllara göre gerçekleştirilen çalışma sayıları, bu çalışmaların türleri ve bu çalışmalarda kullanılan algoritmalar, Şekil 2’de sunulmuştur.



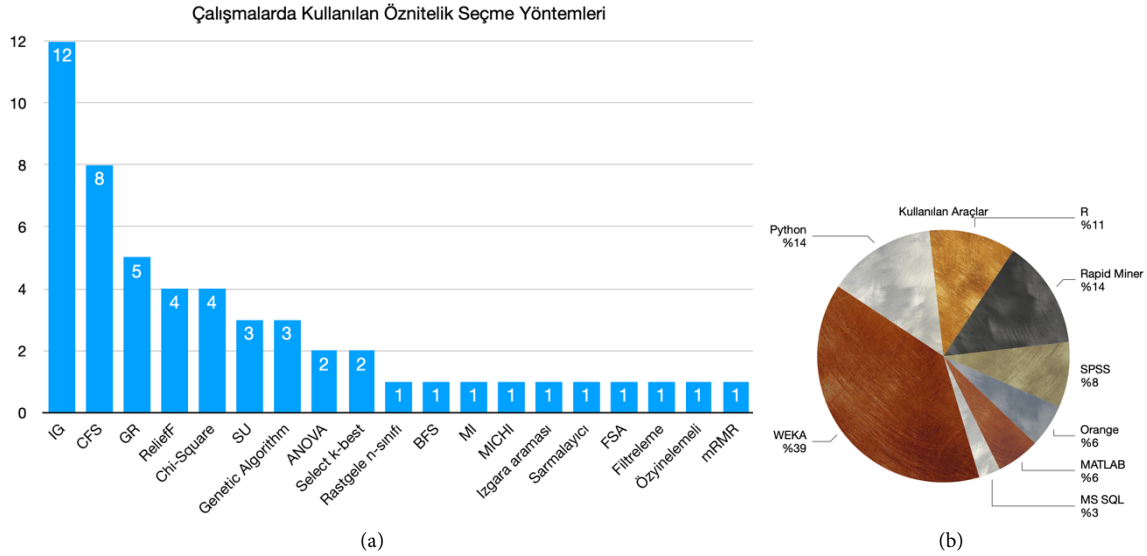


Şekil 2. Çalışma istatistikleri (a) çalışmalarda kullanılan algoritmalar (b) yıl bazında erişilen çalışma sayıları, (b) erişilen çalışma türü oranları

(Study statistics (a) algorithms used in the studies (b) number of studies accessed by year, (b) proportion of types of studies accessed)

Şekil 2.a'da görüldüğü gibi çalışmalarda en çok Naive Bayes (NB) algoritması test edilmiştir. Daha sonra Karar Ağaçları (Decision Tree-DT) gelmektedir. Üçüncü en sık kullanılan algoritma ise Rastgele Orman (Random Forest-RF) algoritmasıdır. Şekil 2.b'de görüldüğü gibi özellikle son 5 yılda bu alanda gerçekleştirilen çalışmaların sayısı artmaya başlamıştır. Ayrıca Şekil 2.c'de görüldüğü gibi çalışmaların büyük bir yüzdesi makale türündedir (%69). Elde edilen çalışmalardan %26 bildiri geri kalan %5'i ise tezli yüksek lisans çalışmasıdır.

Bu çalışmalarda birçok farklı yöntem uygulanmış, yeni yöntemler test edilmiş ve farklı öneriler ortaya konulmuştur. Bu çalışmaların hemen hemen hepsinde birden fazla teknik uygulanmış ve farklı algoritmalar test edilmiştir. Araştırmalarda kullanılan öznelik seçme yöntemleri ve kullanılan analiz araçları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Çalışmalarda kullanılan (a) öznitelik seçim yöntemleri ve (b) analiz araçları  
(a) feature selection methods and (b) analysis tools used in the studies

Şekil 3.a'da en çok kullanılan öznitelik seçme tekniğinin Bilgi Kazancı (Information Gain-IG) teknik olduğu görülmektedir. İkinci sık kullanılan teknik Korelasyon Tabanlı Özellik Seçimi (Correlation-based Feature Selection-CFS) tekniğidir. Üçüncü sırada en yaygın kullanılan teknik ise Kazanç Oranı (Gain Ratio-GR) tekniğidir. Şekil 3.b'de görüldüğü gibi araştırmalarda en çok tercih edilen analiz aracı WEKA olmuş, bu aracı sırasıyla Python programlama dili, R programlama dili ve Rapid Miner aracı takip etmiştir. Öznitelik seçme yöntemleri kullanılarak yapılan ve öznitelik seçme yöntemleri kullanılmadan yapılan çalışmalar bu bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır.

Altun ve arkadaşları (2019) çalışmalarında üniversite öğrencilerinin mezuniyet notlarını tahmin etmek üzere veri madenciliği modelleri geliştirmişlerdir. Bu amaçla; Akdeniz Üniversitesi Eğitim Fakültesi Sınıf Öğretmenliği Bölümü'nden 2012-2017 yılları arasında mezun olan 578 öğrencinin cinsiyet, medeni durum, kayıt yaşı ve birinci sınıf birinci dönem ara sınav puanlarına ilişkin veriler kullanılmıştır. Öğrenci bilgi sisteminden elde edilen verilere Rapid Miner platformundaki araçlar kullanılarak veri ön işleme uygulanmıştır. Elde edilen veri setinde öğrenci kod, cinsiyet, medeni durum, kayıt yaşı ve 8 derse ait ara sınav puanları olmak üzere 12 öznitelik yer almaktadır. Rapid Miner yazılımında, Çoklu Doğrusal Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları (YSA) ile tahmin modelleri oluşturulmuştur. Ortalama mutlak hata yüzdesi değerleri temel alınarak yapılan değerlendirmede; Regresyon analizi modeli ile %94.30 ve YSA modeli ile %94.43 başarı sağlandığı belirtilmiştir [17].

Yıldız ve Börekçi (2020), farklı okullardaki dokuzuncu sınıf öğrencilerinden toplanan eğitim ile ilgili veriler üzerinde bir fikir geliştirilmeye çalışmışlardır. Veriler; öğrenciler ve aileleri, çalışma rutinleri, öğrenme etkinliklerine katılma davranışları ve bilim hakkındaki düşüncelerini içermektedir. Araştırma toplanan verilerden sınavla öğrenci alan okulda okuyan ve sınavsız öğrenci alan okulda okuyan öğrencileri sınıflandırma problemi olarak ele alınmıştır. Oluşturulan modeller iki sınıf verisi üzerinden tahmin edilmiştir. Çalışmada, denetimli sınıflandırma algoritmalarının tahmin doğrulukları karşılaştırılmış ve sınıfların oluşumunda hangi değişkenlerin etkili olduğu tanımlanmıştır. Arayüz olarak Orange uygulaması kullanılmıştır. Tahmin doğruluğunu etkileyen faktörleri belirlemek için değişkenlerin bilgi kazanç katsayısını incelemişlerdir. Ailenin demografik değişkenlerinin, öğrencinin bilimsel inançlarının, çalışma rutinlerinin ve bazı derslere yönelik tutumlarının sınıflandırmayı etkilediği belirtmişlerdir. Kullanılan makine öğrenme algoritmaları: YSA, K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbor - KNN), Lojistik Regresyon (Logistic Regression - LR), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine - SVM), Karar Ağacı (Decision Tree - DT), Rastgele Orman (Random Forest - RF) ve Naive Bayes (NB) algoritmalarıdır. Makine öğrenmesi algoritmalarının

tahmin sonuçları karşılaştırıldığında YSA algoritmasının yaklaşık %98.6 başarı oranı ile en iyi model olduğu görülmüştür [18].

Ahmad ve arkadaşları (2015) çalışmalarında üniversite birinci sınıf öğrencilerinin Bilgisayar Bilimleri dersindeki akademik performansını tahmin etmek için bir veri madenciliği uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Veriler, öğrencilerin demografik özelliklerini, önceki akademik kayıtlarını ve aile geçmiş bilgilerini içeren 2006-2007 ile 2013-2014 yılları arasındaki bilgileriyle oluşturulmuştur. Bu çalışmada, öğrencilerin not ortalamaları bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Kullanılan diğer öznitelikler ırk, cinsiyet, aile geliri, üniversiteye giriş şekli ve üç konuda Malezya Eğitim Sertifikası notlarıdır. Çalışmada WEKA veri madenciliği yazılımı kullanılmıştır. Karar Ağaçları, Naive Bayes ve Kural Tabanlı sınıflandırma algoritmaları veri setine uygulanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Kural Tabanlı Algoritma, %71.3'lük doğruluk oranı ile karşılaştırılan üç algoritma arasında en yüksek oranı elde eden algoritma olmuştur. Ayrıca literatürdeki çalışmalar içerisinde Kural Tabanlı Algoritma kullanılan tek çalışma budur. Çalışmada tahmin modelinden çıkarılan bilgiler ile öğrencilerin ilk dönemdeki başarı düzeyinin belirlenebileceği böylece başarısızlık ihtimali bulunan öğrenciler için gerekli önlemlerin alınabileceği ve gerekli iyileştirmelerin yapılabileceği belirtilmiştir. Çalışmanın sınırlı tarafının, toplanan verilerdeki eksik değerler nedeniyle küçük veri boyutu olduğu belirtilmiştir [19].

Hussain ve arkadaşları (2018) çalışmalarında Assam'da yer alan üç kolejde okuyan öğrencilerin dönem sonu başarılarını tahmin etmek amacıyla veri madenciliği yöntemlerini kullanmışlardır. Veri seti üç kolejde okuyan 300 öğrencinin 24 nitelik altında sosyo-ekonomik, demografik ve akademik bilgileri toplanarak oluşturulmuştur. Veri temizleme ile 22 niteliğe düşen öznitelik sayısı WEKA programı ile yapılan öznitelik seçimi sonrası 12'ye indirgenmiştir. Öznitelik seçimi için korelasyon tabanlı öznitelik seçimi (Correlation based - CFS), kazanç oranı öznitelik seçimi (Gain Ratio - GR), bilgi kazancı öznitelik seçimi (Information Gain - IG), simetrik belirsizlik öznitelik seçimi (Symmetrical Uncertainty - SU) kullanmışlardır. Bu öznitelik seçim yöntemleri kullanılarak toplam 11 özniteliğin oldukça etkili olduğu bulunmuştur. WEKA programında J48, PART, RF ve BayesNet olmak üzere toplam dört sınıflandırma algoritması denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca Apriori algoritması ek olarak veri setindeki gizli kuralları ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. RF algoritması öznitelik seçimli ve öznitelik seçimsiz olarak veri seti üzerinde uygulanmıştır. Öznitelik seçimli olarak RF algoritmasının daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Sonuçta RF algoritması %99 doğruluk oranı ile en başarılı algoritma olmuştur [20].

Saa ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada öğrenci bilgi sisteminden çıkarılan yeni bir veri kümesine dayalı olarak öğrencilerin akademik performansını tahmin etmişlerdir. Veri kümesi Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki özel bir üniversiteden alınmıştır. Veri kümesi, öğrencilerin bilgileriyle ilgili 34 öznitelik ve 56.000 kayıt içerir. RapidMiner yazılımını kullanmışlardır. DT, RF, Gradyan Artırılmış Ağaçlar (Gradient Boosted Trees - GBT), Derin öğrenme, NB, LR, Genelleştirilmiş Doğrusal Model (Generalized Linear Model - GLM) algoritmaları ile çalışmışlardır. IG öznitelik seçim tekniklerini kullanmışlardır. Öğrencilerin akademik performansı üzerinde doğrudan etkisi olan en önemli özelliklerin, öğrencilerin demografik özellikleri, öğrencilerin önceki performans bilgileri, ders ve öğretmen bilgileri ve öğrenci genel bilgileri olmak üzere dört ana kategoride olduğu belirtilmiştir. Öznitelik seçimi ile 17 öznitelik belirlenmiş ve bu öznitelikleri ile modelleri kurmuşlardır. Genel olarak, öğrencilerin akademik performansını tahmin etmek için en uygun veri madenciliği algoritmasının %75.52 doğruluk oranı ile RF olduğu belirtilmiştir [21].

Fernandes ve çalışma arkadaşları (2019) çalışmalarında 2015-2016 eğitim öğretim yılında Brezilya Federal Bölgesi'ndeki devlet okullarında öğrenim gören öğrencilerin akademik performanslarının tahminini gerçekleştirmeyi ve öğrenci başarısızlıklarını düşürmeyi amaçlamışlardır. Öğrencilerin performansının erken tahminiyle öğrencilerin mezuniyetlerini garanti altına alacak ve yüksek öğrenim için notlarını en azından geçer bir seviyeye yükseltmelerine yardımcı olacak şekilde gerçekleşmesinin sağlanabileceği belirtilmiştir. Çalışma lise üçüncü sınıftaki öğrencileri kapsamaktadır. Çalışılan veriler, Brezilya Federal Bölgesi Eğitim

Bakanlığı'nın bir havuzundan elde edilmiştir. Başlangıçta bu verilerin nicel bilgilerini elde etmek için tanımlayıcı bir istatistiksel analiz yapılmıştır. Bu aşamada, 17 özneliği kapsayan bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlar okulun bulunduğu şehir, okul adı, sınıf dönemi, bir sınıftaki özel gereksinimli öğrencilerin varlığı, sınıf türü, öğrencinin adı, cinsiyet, yaş, öğrencinin ikamet ettiği yer, varsa öğrencinin özel ihtiyaçları, ilk iki ayın notları, devamsızlıklar ve öğrencinin okul yılını geçip geçmediği ve benzeri özellikleridir. Bu analizden sonra iki veri seti elde edilmiştir. İlk veri seti, okul yılının başlamasından önce elde edilen özneliliklerdir. İkincisi veri seti ise ilk veri setine ek olarak sömestrin başlamasından iki ay sonra toplanan devamsızlık, notlar ve okul dersleri gibi akademik değişkenleri içermektedir. Her veri seti için öğrenci performansını tahmin etmek üzere artırma tekniği ile geliştirilen karar ağacı modeli olan Gradyan Artırılmış Makine (Gradient Boosting Machine - GBM) ile sınıflandırma modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sınıflandırma modelleri, Alıcı çalışma karakteristiği (Receiver Operating Characteristic - ROC) eğrisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, notlar ve devamsızlık niteliklerinin yılsonu öğrenci performansını tahmin etmek için en önemli değişkenler olduğu belirtilmiştir. Artırma tekniği kullanılarak %99 doğruluk oranı elde etmişlerdir [22].

Aydın ve Özkul (2015) yaptıkları çalışmada Anadolu Üniversitesi açık öğretim sisteminde eğitim gören öğrencilerin performanslarını tahmin etmeye yönelik veri madenciliği uygulaması geliştirmişlerdir. Kullanılan veri seti 2004-2005 ve 2005-2006 öğrenim yıllarına ait öğrenci bilgi sistemi ve e-öğrenme sisteminden elde edilmiştir. Veri seti 180.554 öğrencinin 129 adet dersine ilişkin 429.757 kayıt içermektedir. SPSS Clementine yazılımında öznelilik seçme teknikleri uygulamışlardır. Öğrencinin akademik başarısını etkileyen 11 öznelilik belirlenmiştir. Bu öznelilikler: öğrencinin yaşı, ders adı, öğrencinin dersi kaçınıcı kez aldığı, e-hizmet faydalanma süreleri, sınavlarının ortalaması, deneme sınavlarında yaptığı doğru cevap sayısı ve deneme sınavlarındaki başarı durumudur. Öğrenci performansını değerlendirmeye yönelik tahmin modellerini oluşturmak için SPSS Clementine yazılımında LR, YSA, DT algoritmalarından olan C5.0, CHAID, C&RT ve QUEST modelleri oluşturulmuştur. Sonuçta %82.1 doğruluk oranı ile C5.0 ile elde edilen DT modelinin en iyi tahmin modeli olarak seçildiği belirtilmiştir [23].

Sokkhey ve Okazaki (2020) çalışmalarında eğitsel veri madenciliği kullanarak düşük performans gösteren öğrencileri tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bunun için Karma rastgele orman (Hibrit Random Forest) eğitsel veri madenciliği modelini önermişlerdir. Önerdikleri bu modeli web tabanlı bir sisteme dâhil etmişlerdir. Çalışmada kullanılan veriler; Kamboçya'daki farklı liselerden elde edilmiştir. Çalışmada öncelikle tahmin modellerinin karşılaştırmalı bir çalışması yapılmıştır. Karşılaştırmalar hem orijinal veri seti ile hem de farklı öznelilik seçme yöntemleri ile oluşturulmuş veri setleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yapılan dört sınıflandırıcının (KNN, Hibrit C5.0, Karma rastgele orman ve Geliştirilmiş derin inanç ağları) karşılaştırmalı deneyi, dört öznelilik seçme yönteminden (IG, Ki kare, Karşılıklı bilgi ve önerilen MICHİ yöntemi) elde edilen özellik kümeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öğrenme çıktılarını iyileştirmek, uygun öznelilikler seçmek ve tahmin modellerinin performansını artırmak için karşılıklı bilgi (Mutual Information-MI) ve sıralı özellik puanlarına dayalı ki-kare algoritmalarının birleşimi olan MICHİ adlı yeni bir özellik seçme yöntemi tanıtılmıştır. Deneysel sonuçlara göre karma rastgele orman algoritmasının sınıflandırma sonucu diğer üç sınıflandırıcıdan daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Karma rastgele orman algoritması MICHİ öznelilik seçme yöntemiyle birlikte %99.98 doğruluk ile en başarılı sınıflandırma olmuştur. MICHİ'nin öğrenci performansının başarısı için baskın faktörleri belirlemede etkili bir özellik seçme yöntemi olduğu belirtilmiştir. Veri ön işleme için R programlama dili, R Studio geliştirme ortamında kullanılmıştır [24].

Mengash (2020) yaptığı çalışmada yükseköğretim kurumlarında akademik olarak iyi performans göstermesi muhtemel adayları seçmek için; başvuru sahiplerinin üniversitedeki akademik performansını tahmin etmek üzere veri madenciliği tekniklerini kullanmıştır. Veri seti olarak 2016-2019 arasında bir Suudi devlet üniversitesinin Bilgisayar Bilimi ve Bilgi Koleji'ne kaydolun 2.039 öğrenciye ait veriler kullanılmıştır. Çalışmada öznelilik seçim teknikleri kullanmışlardır ve sonucunda lise not ortalaması, scholastic achievement admission test puanı ve genel yetenek testi puan bilgileri sonuca en çok etki eden öznelilikler olarak

belirlemişlerdir. Çalışmada YSA, DT, SVM ve NB olmak üzere dört iyi bilinen veri madenciliği tekniği kullanılarak dört tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu modeller arasında YSA algoritmaları ile %79'un üzerinde bir doğruluk oranına sahip olarak en başarılı modeli elde etmişlerdir [25].

Çiftçi ve arkadaşları (2018) çalışmalarında üniversitede çalışan akademisyenlerin performanslarını tahmin etmişlerdir. Veri seti olarak "Türkiye Öğrenci Değerlendirme Veri Seti (Türkiye Student Evaluation Data Set)" isimli bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti 2.850 öğrencinin 3 akademisyeni değerlendirdiği anket sonuçlarını içermektedir. Öğrencilerin 13 farklı dersini bu 3 akademisyen vermektedir. Anket çalışması 2013 yılında 33 nitelik üzerinden gerçekleştirilmiştir. Veri setinde yer alan 33 tane nitelik genetik algoritma ile öznitelik seçimi yapılarak çalışmada kullanılmak üzere 19 öznitelige indirgenmiştir. Bilgi kazancı, genetik algoritma ve geri yönlü eliminasyon olmak üzere üç farklı öznitelik seçme yöntemi kullanmışlardır. En başarılı yöntemin genetik algoritma olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, Rapidminer veri madenciliği yazılımı kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemleri olarak KNN, DT, NB ve derin öğrenme algoritmalarını uygulamışlardır. İndirgenen öznitelikler üzerinden derin öğrenme kullanımı ile %97.70'lik tahmin doğruluk performansına ulaşılmıştır [26].

Kumari ve arkadaşları (2020) çalışmalarında YSA algoritmasının veri madenciliğinde öğrenci performansını tahmin etmek için uygun bir sınıflandırıcı olup olmadığını araştırmışlardır. Kaggle sitesinden alınan sınavlarda öğrenci performansı (students performance in exams) adlı hazır veri setini kullanmışlardır. Bu veri seti; Amerika'da lise öğrencilerinden elde edilen verilerden oluşmaktadır. Veri seti, üç sınavdan alınan puanları ve sınav puanları üzerinde etkisi olduğu düşünülen öğrencilere ait çeşitli kişisel, sosyal ve ekonomik faktörleri içermektedir. Veri setinde 8 adet öznitelik yer almaktadır. Bu öznitelikler; cinsiyet, etnik köken, ebeveyn eğitim düzeyi, öğle yemeği, sınava hazırlık kursu, matematik, okuma ve yazma puanıdır. YSA algoritmasının uygulanabilirliğini araştırmak için NB, KNN, RF, DT, SVM ve LR olmak üzere altı sınıflandırıcıyla performans açısından karşılaştırılmıştır. %89.84 doğruluk oranı ile YSA algoritmasının ilgili veri setinde diğer sınıflandırma algoritmalarına göre performans olarak daha iyi olduğu ve öğrenci performansını tahmin etmek için etkili bir algoritma olduğunu belirtmişlerdir [27].

Kaur ve diğerleri (2015) sınıflandırma tabanlı algoritmalar kullanan tahmine dayalı bir veri madenciliği modeli ile lise öğrencileri arasında yavaş öğrenenleri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada 152 öğrenciye uygulanan anketten elde edilen veriler kullanılmıştır. Tüm uygulamalar WEKA aracı kullanılarak yapılmıştır. İlk önce veriler üzerinde öznitelik seçim teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler Ki kare, IG, SU ve ReliefF öznitelik seçim teknikleridir. Bu veriler üzerinde belirlenen öznitelikler kullanarak Çok katmanlı algılayıcı (Multilayer Perception - MLP), NB, Sıralı minimal optimizasyon (Sequential minimal optimization - SMO), J48 ve REPTree gibi çeşitli sınıflandırma algoritmaları uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu %75 doğru tahmin yüzdesiyle MLP algoritmasının verdiği belirtilmiştir [28].

Yıldız Aybek ve Okur (2018) çalışmalarında, Anadolu Üniversitesi Açık öğretim Sisteminde 2014-2015 ve 2015-2016 akademik yıllarında Bilgi Teknolojileri dersini alan öğrencilerin yarıyıl sonu sınav puanlarını ve geçme oranlarını YSA ile tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla 626.478 öğrencinin demografik özellikleri, eğitim durumu, ilgili dersin ara sınav, final ve başarı puanları ile ilgili veriler toplanmıştır. Veri ön işleme sonrasında eksik verilere sahip örneklerin çıkarılması sonucu 195.584 öğrencinin verileri MLP ve Radyal Taban Fonksiyonu (Radial Base Function - RBF) modelleri ile analiz edilmiştir. Veri setinin %70'i alınarak eğitim seti, %30'u alınarak test seti oluşturulmuştur. 6 parametrenin (gizli katman, minimum birim, maksimum birim, eğitim, etkinleştirme işlevi ve sürekli değişkenlerin yeniden ölçeklendirilmesi) farklı kombinasyonlarından oluşan 12 MLP ve 3 parametrenin (gizli katman, etkinleştirme fonksiyonu ve sürekli yeniden ölçeklendirme değişkenleri) çeşitli kombinasyonlarından oluşan 4 RBF oluşturulmuştur. Oluşturulan 16 ağ, öğrencilerin final sınav puanlarını tahmin etmek ve öğrencilerin geçme/kalma durumunu tahmin etmek için iki kez çalıştırılmıştır. Toplam 32 analiz yapılmıştır. İlk analiz sonucunda; 12 MLP ağı ile yapılan analizlerde tahmin edilen ve gerçekleşen puanlar arasında orta düzeyde korelasyon katsayıları görülmüştür.



RBF ağlarının ise final sınav puanlarını açıklamada tutarlı sonuçlar vermediği belirtilmiştir. İkinci analizde; RBF ağlarının geçme/kalma durumlarını veya öğrencileri sınıflandırmada başarılı olmadığı tespit edilmiştir. MLP ağlarının ise genel olarak daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada YSA modellerinin diğer matematiksel modellerle karşılaştırılması amaçlanmasa da farklı parametrelerle elde edilen %85-%87 arasında değişen tahmin doğruluk oranlarının elde edildiğini belirtmişlerdir [29].

Özbay ve Ersoy (2017) çalışmalarında matematik bölümü mezunu öğretmen adaylarının Öğrenme Yönetim Sistemi üzerindeki hareketliliği ile akademik başarıları arasındaki ilişkiyi veri madenciliği yöntemleri ile incelemişlerdir. Çalışmada 2012–2013 öğretim yılı bahar döneminde Başkent Üniversitesi’nde pedagojik formasyon eğitimi alan 40 öğrencinin öğrenme yönetim sistemine ait günlük kayıtları ve yılsonu akademik başarı notları kullanılmıştır. Akademik başarı notları ilgili öğretim elemanından temin edilmiştir. Veri seti üzerinde veri ön işleme işlemleri yapılmıştır. Veri setinde toplam 5,358 öğrenciye ait ve 8 öznitelik vardır. Çalışmada, öncelikle öğrenci akademik başarı gruplarının oluşturulması amacıyla tanımlayıcı modellerden kümeleme yöntemi kullanılmıştır. K-Ortalama algoritması kullanılarak öğrenci yılsonu akademik başarı notlarına göre kümeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğrenciler düşük, orta ve yüksek akademik başarı grubu olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır. Daha sonra bu başarı grupları da girdi değişkeni olarak kullanılarak sınıflandırma yöntemlerinden karar ağacı yapısı ile öğrenci başarı durumları tahmin edilmiştir. Karar ağacı C5.0, CART, CHAID, QUEST algoritmaları kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller arasında en yüksek doğruluk oranını %85 olarak elde eden CART algoritması olduğu belirtilmiştir. Analizlerde SPSS Clementine programı kullanılmıştır. Sonuç olarak öğrenme yönetim sisteminde yüksek düzeyde hareketli olan öğrencilerin yüksek akademik başarı grubunda, orta düzeyde hareketli olan öğrencilerin orta akademik başarı grubunda ve düşük düzeyde hareketli olan öğrencilerin düşük akademik başarı grubunda yer aldıklarının tespit edildiği belirtilmiştir [30].

Baltacı (2018) çalışmasında, İlahiyat fakültesi öğrencilerine yönelik veri madenciliği alanında bir uygulama gerçekleştirmiştir. Öğrencilerin yaşı, cinsiyeti, anne ve babanın eğitim durumu, liseyi bitirdikten sonra kaçınıcılığında üniversiteye yerleştiği, yerleştikleri fakülte, tercih sırası, yerleşme puanı, üniversitede aldığı derslerin not ortalaması, üniversitede başarısız ders sayısı ve gibi verilerinden faydalanılarak, akademik başarıya etki eden faktörler bulunmak istenmiştir. Kullanılan veriler 2017 yılında 11 farklı devlet üniversitesinin İlahiyat fakültelerinde öğrenim gören 2. Sınıf öğrencilerinden temin edilmiştir. Veri seti üzerinde ön işleme olarak veri temizleme, veri dönüştürme ve veri ayrıştırma işlemleri yapılmıştır. Veri ön işleme sonucunda toplam 3,775 öğrenciye ait veri, makine öğrenmesi algoritmalarında kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Öğrencinin akademik başarısı, öğrencinin not ortalaması ve başarısız olunan ders sayısına göre incelenmiştir. Öğrencinin başarısız olduğu ders sayısı ve yılsonu not ortalaması bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Çalışmada veri madenciliği tekniklerinden kümeleme analizi, gruplama yöntemi, regresyon ve korelasyon ilişkilendirme teknikleri kullanılmıştır. İstatistik anlamlılık düzeyi  $p < 0.05$  olarak kabul edilmiştir. Veri madenciliği analiz sonucuna göre yılsonu not ortalaması ve başarısız olunan ders sayısı arasında yüksek düzeyde negatif yönlü bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Not ortalamasındaki artış, öğrencinin başarısız olduğu ders sayısının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca yılsonu not ortalaması ile yaş arasında da yüksek düzeyde negatif ilişki belirlenmiştir. Yaşı daha büyük öğrencilerin yılsonu not ortalamasının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Böylelikle öğrencinin yaşı, not ortalamasını olumlu yönde etkilemediği görülmüştür. Ayrıca öğrencinin yaşı, başarısız olduğu ders sayısını olumlu yönde etkilediği de belirtilmiştir. Çalışma için “Orange Datamining”, “D-Melt” ve “SPSS Modeller” veri madenciliği programları kullanılmıştır [31].

Hazel Başer ve arkadaşları (2020) çalışmalarında, ortaöğretimde öğrenci başarısını olumsuz etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve öğrencilerin karşılaştıkları sorunların tespit edilmesini amaçlamışlardır. Çalışmada kullanılan veri seti “UC Irvine Machine Learning Repository” veri tabanından elde edilmiştir. Veri seti 395 öğrencinin 33 özneliğinden oluşmaktadır. İlgili veriler okul raporu ve anketlerden elde edilmiştir. Veri içeriğindeki öznitelikler öğrencinin; yılsonu ders notları, kişisel bilgileri, okul içi ve dışı sosyal etkinliklerini kapsamaktadır. Veri seti üzerinde veri madenciliği yöntemlerinden Classifier, OneR, LogitBoost

ve YSA ile modeller kurulmuştur. Değerlendirmelerin objektif olarak yapılabilmesi için her sınıflandırma modeli 3 ayrı çapraz doğrulama (5, 7 ve 10 kat) bölünme yöntemi kullanılmıştır. Tüm modeller WEKA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellerin değerlendirilmesi için doğruluk, özgünlük ve duyarlılık performans metrikleri kullanılmıştır. Sonuç olarak çalışmada uygulanan OneR algoritması en başarılı veri madenciliği yöntemi olmuştur. Doğruluk değerinin ortalama %92.15, özgünlük değerinin ortalama %86.6, duyarlılık değerinin ise ortalama %96 olduğu belirtilmiştir [32].

Can ve çalışma arkadaşları (2019) çalışmalarında veri madenciliği tekniklerinden LR analiziyle öğrencilerin ders başarılarını etkileyen faktörleri araştırmışlardır. Çalışmada, bir devlet üniversitesine ait dönem sonu ders değerlendirme anket verilerini içeren hazır bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti, 5.820 öğrenci tarafından yanıtlanan anket verilerinden elde edilmiştir. Veri seti, öğrencilerin derslerine giren 3 farklı öğretim üyesi hakkında tanımlanmış 28 soru ve 5 tane de demografik bilgileri içeren kategorik değişken olmak üzere toplam 33 öznitelikten oluşmaktadır. Çalışmalarında kullandıkları veri setine LR algoritması ile sınıflandırma modeli kurmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre, öğrenci ders başarısını ders tekrar sayısının etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca öğrencilerin mesleki gelişimlerini arttıran, öğrencilere yeni bakış açıları kazandıran uygulamaların ve derse katılımın ders başarısını olumlu olarak etkilediğinin görüldüğü belirtilmiştir. LR analizi sonucunda yapılan tahminlerde doğru sınıflandırma oranını %84.1 gibi oldukça yüksek bir değer elde etmişlerdir. Yani 5,820 adet verinin 4,895 tanesi doğru sınıflandırılırken yalnızca 925 tanesi yanlış sınıflandırılmıştır [33].

Gladshiya ve Sharmila (2021) çalışmalarında eğitim alanında öğrencilerin performansı tahmin etmek için öğrencilerin riskini belirlemeyi esas almışlardır. Öğrenci risklerini belirleyerek performansları makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Öğrencinin performansını tahmin etmek için veri ön işleme ve özellik seçiminin çalışma yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Performance of student isimli veri setini, www.kaggle.com adresinden temin etmişlerdir. Veri seti 1,000 satır ve 8 öznitelik içeren virgülle ayrılmış değer (csv) dosya biçimindedir. Nitelikler; cinsiyet, kentsel durum, ebeveyn eğitimi, öğle yemeği, ölçek hazırlık, matematik puanı, fen ve okuma puanlarıdır. Veri setinde öznitelik seçimi yöntemlerinden sınıflandırma ve filtreleme metotları kullanılmıştır. Bu yöntemlerden rastgele n-sınıf sınıflandırıcı, Varyans analizi filtresi, Select K-Best yöntemleri ile öznitelikler belirlenmiştir. Select K-Best öznitelik seçim metodunu önermektedirler. Belirlenen öznitelikler ile SVM algoritması kullanılarak veri seti eğitilmiş ve tahmin değerleri elde edilmiştir. Bu algoritma, Jupyter Notebook kullanılarak Python programlama dili kullanılarak uygulanmışlardır. Öznitelik seçimleri yapılarak doğruluk oranlarında önemli ölçüde farklılık gösterdiği belirtilmiştir. SVM algoritmasıyla rastgele n-sınıf sınıflandırıcı ile 3 sınıf için tahmin edilen doğruluk oranı %52 iken 4 sınıf için tahmin edilen doğruluk oranı %72' ye çıktığını belirtmişlerdir [34].

Abbasoğlu (2020) çalışmasında, eğitsel veri madenciliği yöntemleri kullanarak, ortaokul öğrencilerinin sosyoekonomik durumlarının ve demografik özelliklerinin yılsonu genel başarı ortalamalarına olan etkilerini analiz etmeyi amaçlamıştır. Örneklem olarak 2019-2020 eğitim-öğretim yılı ikinci dönemi içinde Yalova iline ait 4 farklı ortaokuldaki 5, 6, 7 ve 8. Sınıf düzeylerinde okuyan 1,395 ortaokul öğrencisi seçilmiştir. Çalışmada, E-okul Yönetim Bilgi sisteminden elde edilen öğrencilerin kişisel özelliklerine ilişkin veriler kullanılmıştır. Sistemden elde edilen veriler 27 bağımsız değişken ile temsil edilmiştir. Tahmin sonuçlarını artıracığı düşünülen korelasyona dayalı öznitelik seçim teknikleri kullanılarak 27 bağımsız değişken 8'e düşürülmüştür. Elde edilen veri seti üzerinde makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yılsonu genel başarı ortalamaları tahmin edilmiştir. Tüm algoritmalar WEKA programında çalıştırılmıştır. Bu algoritmalar; LR, NB, Linear SVM, KNN, RF, Non-Linear SVM, Torbalama (Bagging), MLP algoritmalarıdır. Veri seti öznitelik seçimi yapılmadan, temel bileşen analizi yapılarak ve öznitelik seçimi uygulanarak 3 farklı veri seti üzerinden analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modellerin performanslarını değerlendirmek için doğruluk oranı kullanılmıştır. Çalışmalarında, en iyi sonuca ulaşabilmek için 10 kat çapraz doğrulama ile bölünme yöntemi kullanarak modeller oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlara göre sınıflandırma yöntemlerinden en başarılı

sonucu %62 ile %64.5 arasında doğruluk oranları ile LR algoritmalarıyla kurulan modellerden elde etmişlerdir [35].

Aghalarova ve Keser (2022) çalışmalarında öğrencilerin akademik performanslarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada kullanılan veri seti için otomatik makine öğrenmesi yöntemi ile en iyi modeli araştırmışlardır. Veri önileme, model seçimi ve hiper-parametre optimizasyonu gibi görevlerle uğraşmadan en iyi modelin otomatik makine öğrenmesi ile bulunabileceğini savunmuşlardır. Çalışmalarında H2O AutoML aracı kullanmışlardır. Tüm deneyler, Python'un 3.7.9 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir. Çalışmada kullanılan veri seti Kalboard 360 E-öğrenme sisteminden toplanmıştır. Veri seti 480 öğrenciye ait 17 öznelikten oluşmaktadır. Öznelikler; demografik, akademik ve davranışsal öznelikler olmak üzere üç esas kategoridedir. AutoML sayesinde veri önileme ve en uygun modelin seçimi otomatik gerçekleştirilmektedir. Dağıtılmış RF (Distributed Random Forest - DRF) algoritmasında varsayılan hiper-parametreler kullanıldığında doğruluk değerini %77.50 ve f-skor değeri %80.01 olarak elde etmişlerdir. Bu sebeple dağıtılmış RF algoritmasının en iyi algoritma olduğunu belirtmişlerdir. En uygun hiper-parametreleri bulabilmek için ızgara araması kullanmışlardır. Izgara araması ile bulunan en uygun hiper-parametreler ile tekrar dağıtılmış RF algoritması uygulandığında doğruluk değeri %82.30 ve f-skor değeri %82.50 olarak hesaplamışlardır. Önerilen yöntem ile geleneksel makine öğrenme yöntemlerinden KNN ve SVM algoritmaları karşılaştırılmıştır. KNN algoritmasında doğruluk değeri %61.1 ve f-skor değeri %61.01, SVM algoritmasında ise sırasıyla doğruluk değeri %64.5 ve f-skor değeri %64.4 olarak elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar önerdikleri yöntemin etkinliğini ve başarısını kanıtlamaktadır [36].

Aydemir (2019) çalışmasında, öğrencinin başarı durumunu önceden öngörerek gerekli önlemlerin alınabileceğinden yola çıkarak öğrencilerinin Yabancı Dil dersinden geçme notlarını makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin etmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla 2017-2018 eğitim-öğretim yılının tüm dönemlerinde Yabancı Dil dersini alan 3.794 ön lisans ve lisans öğrencisine ait veriler kullanılmıştır. Veri setinde 12 tanesi bağımsız ve bir tanesi bağımlı olmak üzere toplam 13 adet öznelik vardır. Bu öznelikler: ÖSS giriş türü, ÖSS giriş puanı, ÖSS giriş sıralaması, öğrenim tipi, fakülte, bölüm, program, program tipi, öğretmen, öğretmen unvanı, bir önceki dönemin not ortalaması, aktif dönem not ortalaması ve ders geçme notudur. Verilerin eğitim ve test olarak bölünmesinde 10-katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada YSA, M5P, Karar Kütüğü, M5Rules, Karar Tabloları, Torbalama yöntemleri kullanılarak tahmin modelleri geliştirilmiştir. Tüm modeller WEKA programı aracılığıyla ile kurulmuştur. Veriler 19 farklı makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak modeller kurulmuş, analiz edilmiş ve tahmin sonuçları elde edilmiştir. Tüm modellerin başarı oranları karşılaştırılmıştır. Torbalama yöntemi ile kurulan modelin 0.80 korelasyon katsayısı ve 1.22 ortalama mutlak hata ile tahmin yaparak en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir [37].

Assistant ve çalışma arkadaşları (2021) çalışmalarında öğrencinin akademik performansını tahmin etmek için çapraz doğrulama yöntemi uygulayarak bazı öznelik seçim algoritmalarında kullanılan sınıflandırma algoritmaları ile temel sınıflandırma algoritmalarının tahmin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Öznelik seçim algoritmalarından, Korelasyon Öznelik Değerlendiricisi (Correlation Attribute Evaluator - CAE), Bilgi Kazancı Öznelik Değerlendiricisi (Information Gain Attribute Evaluator - IGAE) ve Kazanç Oranı Öznelik Değerlendiricisi (Gain Ratio Attribute Evaluator - GRAE) yöntemlerini kullanmışlardır. Bu sayede, sonucu tahmin etmek için herhangi bir madencilik sürecine katkıda bulunmayan özellikleri kaldırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada halka açık iki veri kümesi kullanmışlardır. Veriler iki farklı Portekiz lisesinden gelen ortaokul öğrencileri tarafından derlenmiştir. Öğrencilerin notlarının yanı sıra sosyal, demografik ve okulla ilgili bilgilerin tümü veri toplamaya dâhil edilmiş. Her iki veri kümesi de toplam 33 öznelik içerir. WEKA üzerinde uygulanan sınıflandırma algoritmaları NB, RF, J48, MLP, JRip, LR ve Karar tablosu algoritmalarıdır. 10 kat çapraz doğrulama yöntemi ile farklı sınıflandırma algoritmalarının uygulama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Tüm özellikler kullanıldığında karar tablosu algoritması, %76.11 ile en yüksek doğruluk oranını elde etmiştir. Öznelik değerlendirici algoritmaları uygulandıktan sonra tahmin sonucu

üzerinde en fazla etkiye sahip olan on farklı öznelik seçilmiştir. Araştırmacıları bu işlemin doğruluk yüzdelerinde yüzde 10 ila 15 fark oluşturduğunu belirtmişlerdir [38].

Butto ve arkadaşları (2020) çalışmalarında öğrencilerin akademik performansını makine öğrenme algoritmaları ile tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada kullanılan veri seti 500 öğrencinin 16 farklı öznelik bilgisini içerir. Hem WEKA aracı hemde Jupyter not defterinde çalıştırılan Python 3 kullanılarak LR ve SVM algoritmalarını kullanarak sınıflandırma modellerini kurmuşlardır. Önerilen model üzerinde uygulanan algoritmaların sonuçları ve kalitesi, hatırlama, kesinlik ve f1-skoru ve doğruluk gibi dört değerlendirme ölçüsüne dayalı olarak karşılaştırmışlardır. Jupyter aracılığıyla elde edilen sonuçlara bakıldığında LR algoritması %71 doğruluk oranına, SVM algoritması %78 doğruluk oranına ulaştığı görülmüştür [39].

Karthikeyan ve arkadaşları (2017) çalışmalarında farklı veri madenciliği tekniklerine dayalı olarak öğrencilerin performansını artırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma için performansı göstermek için iki farklı boyutta veri seti kullanılmıştır. Birinci veri setinin adı Student Performance Dataset olup veri seti toplam 395 kayıt ve 33 özneliğe sahiptir. Bu veriler, iki Portekiz okulunun orta öğretimindeki Matematik ve Portekiz dili derslerindeki öğrenci başarısını ele almaktadır. Veri seti raporlar ve anketler kullanılarak toplanmıştır. İkinci veri seti College Real Dataset adında, CMS College of Science and Commerce'den temin edilmiştir. Veri setinde toplam 650 kayıt, 52 tane öznelik vardır. Öğrencilerin okula girmeden önce seçilmesinde kullanılan notlarıyla ilgili değişkenleri içerir. Geliştirilmiş performans dayalı bir Öğrenci Performans Tahmin Sistemi (SPPS) tasarlayıp uygulayarak optimizasyon tekniklerine dayalı bir öznelik seçim algoritması önermişlerdir. Akademik verileri kullanarak özellik seçimi ve topluluk sınıflandırma algoritmaları kullanmışlardır. Sınıflandırma algoritmaları olarak DT, NB, YSA, Kümeleme, Birliklik kuralı madenciliği, Tahmin, Zaman serisi analizi, Büyük verilerden bilgi keşfi için Sıralı model, Genetik algoritma ve KNN teknikleri kullanmışlardır. Çalışmalarında, iki veri madenciliği olan Kümeleme (Geliştirilmiş K-Ortalamları) ve Sınıflandırma (SVM) tekniklerini birleştirmişlerdir. Bunun adına CESVM-SPPS demişlerdir. Modelin performansını artırmak için birleştirilen sınıflandırıcılar ve KNN olmak üzere üç sınıflandırıcının birleştirmesini de önermektedirler. Deneylerde Level 1 (Geri Yayılımlı sinir ağı, KNN, CESVM) ve Level 2 (CESVM) seviyelerini kullanmışlardır. Deneysel sonuçlara göre CESVM-SPPS modelinde birinci veri seti için doğruluk oranı %84, ikinci veri seti için doğruluk oranı %82 olarak elde etmişlerdir. 2 Adımlı SPPS ile birlikte Level 1 sınıflandırıcı olarak SVM ve seviye 2 Sınıflandırıcı olarak CESVM uygulandığı zaman modelde başarı oranı yaklaşık olarak birinci veri seti için %90, ikinci veri seti için %85 olduğunu söylemişlerdir. Önerilen SPPS, CESVM-SPPS olarak adlandırarak tahmin hızını artırdığını ve tahmin doğruluğunu artırdığını savunmuşlardır [40].

Shreem ve arkadaşları (2022) çalışmalarında öğrencilerin performansını tahmin sistemleri oluştururken eğitim verilerinden anlamlı bilgi çıkarmanın karmaşık bir iş olduğunu, bu nedenle veri boyutunu azaltmak gerektiğini savunmuşlardır. Çalışmalarında sarmalayıcı öznelik seçim algoritması olarak geliştirilmiş bir ikili genetik algoritma (EBGA) önermişlerdir. Bir k-ortalama algoritmasına ve elektromanyetik benzeri mekanizma yöntemine dayalı yeni hibrit seçim mekanizması önerilmiştir. Önerilen EBGA ile beş farklı sınıflandırıcı (KNN, DT, NB, SVM ve Doğrusal Ayrıcı) arasında hibrit bir makine öğrenimi yaklaşımı kullanmışlardır. Bu yazıda UCI Machine Learning Repository'den elde edilen iki gerçek vaka çalışması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın ikili genetik algoritmanın performansını artırma yeteneğini göstermiştir. Ayrıca, tüm sınıflandırıcıların performansları %1 ve %11 arasında iyileştirilmiştir. En iyi sonucu ilk veri seti için NB sınıflandırıcısıyla %87 doğruluk oranı, ikinci veri seti için KNN sınıflandırıcısıyla %92 doğruluk oranı elde edilmiştir. Önerilen algoritma Matlab R2019b'de kodlanmıştır [41].

Mueen arkadaşlarıyla birlikte (2016) çalışmalarında öğrenci performansını etkileyen özellikleri tespit etmeyi, öğrencilerin akademik performanslarını tahmin etmeyi ve farklı veri madenciliği algoritmalarıyla

sınıflandırma yapıp doğruluğunu karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada, aynı öğretim üyesi tarafından verilen 2014-2015 eğitim yılına ait Programlama Temelleri ve Gelişmiş İşletim Sistemleri lisans derslerine kayıt yaptıran öğrencilerin 38 tane farklı özelliklerinin olduğu verileri toplamışlardır. Veri madenciliği sınıflandırması için NB, MLP ve DT (J48) olmak üzere 3 farklı algoritma kullanmışlardır ve bu işlemler için WEKA aracını kullanmışlardır. Sınıflandırma tekniklerini uygulamadan önce veri kümesinin ön işleme yapılması gerektiğini ve bu işlemlerin sonucu doğrudan etkilediğini vurgulamışlardır. Ön işleme olarak özellik seçimi, dengesiz veri dağılımı ve veri dönüşümü yapılmasını önermektedirler. Oluşturdukları modelleri sınıflandırma algoritmalarında kullanmak üzere 10 kat çapraz doğrulama kullanmışlardır. Bunlardan dokuzu modeli eğitmek için ve biri modelin testi için kullanılmıştır. Üç sınıflandırıcının tahmini performansını karşılaştırmışlardır. Tüm veri seti ile yapılan ve özellik seçimi yapıldıktan sonra oluşturulan modellerin sonuçlarına göre her iki durumda da NB sınıflandırıcısının %86 ve %85.7 tahmin doğruluğu elde ederek diğer iki sınıflandırıcıdan daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [42].

Gajwani ve Chakraborty (2021) çalışmalarında bir eğitim veri setinin belirli özelliklerine dayalı olarak bir öğrencinin akademik performansını tahmin etmek ve öğrencilerin notlarını doğrudan etkileme olasılığı en yüksek olan özelliklerin bir alt kümesini belirlemek ve böylece tahmini daha doğru hale getirmeyi amaçlamışlardır. Kullandıkları veri setindeki nitelikler öğrencilere ait demografik, davranışsal ve akademik bilgilerdir. Öznitelik seçiminden sonra çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak öğrenci performanslarını değerlendirmişlerdir. DT, LR, NB sınıflandırıcısı gibi denetimli öğrenme algoritmaları ve Torbalama, RF sınıflandırıcısı gibi topluluk makine öğrenimi algoritmaları ile deneyler yapmışlardır. Topluluk makine öğrenimi algoritmaları, bir veya daha fazla temel algoritmayı birleştirerek tahminin doğruluğunu olumlu yönde geliştirdiğini belirtmişlerdir. Yükseltme, Oylama ve RF sınıflandırıcıları veri kümesinde en iyi sonuçları vermiştir. Yükseltme %75'lik bir tahmin doğruluğu elde ederken, Oylama ve RF sınıflandırıcılarının her ikisi de %74.31'lik bir doğruluk elde etmiştir. Seçilen özelliklerden herhangi birinin çıkarılmasının sınıflandırıcıların doğruluğunu azalttığını belirtmişlerdir [43].

Bertolini ve arkadaşları (2021) çalışmalarında öğrencilerin fen dersi için başarılarını tahmin etmeyi, öğrenme ortamındaki eğitim kaygılarını ele almayı ve risk altındaki öğrencileri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Kullanılan veri seti 3.225 öğrenciye ait bilgiler içermektedir. Veri setinde toplam 57 özellik vardır. Veri seti üzerinde dört veri madenciliği algoritması ve öznitelik seçim tekniklerinden 4 filtre özelliği kullanmışlardır. Bunlar CFS, Fisher puanlama algoritması (FSA), IG ve Relief özellik değerlendirmesidir. Tüm teknikler R ara yüzünde uygulanmıştır. Kullanılan sınıflandırma algoritmaları ise LR, Elastik ağ regresyonu, RF ve Aşırı gradyan artırma (XGBoost) algoritmalarıdır. Çalışmada, verilerin çapraz doğrulama adımıyla özellik seçimini bütünleştiren bir yöntem kullanmışlardır. Ayrıca filtre özelliği seçim teknikleri yine kullanarak verilerin alt kümeleri üzerindeki etkili özellik kümelerini karşılaştırılmıştır. Öznitelik seçim teknikleri CFS ve FSA'nın üniversite biyolojisi için veri setinde veri madenciliği yöntemlerinden LR ve Elastik ağ regresyonu için ortalama ROC eğrisi altında kalan alanı (Area Under Curve-AUC) önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ortalama AUC değerleri 0.90'ı aştığı belirtilmiştir. Sonuç olarak filtre yöntemlerinin veri madenciliği metodlarının performansını artırma potansiyeline sahip belirtmişlerdir [44].

Aghalarova ve Keser (2021) çalışmalarında ortaokul öğrencilerinin akademik performansını tahmin etmek amaçlamışlardır. Bunun için YSA algoritması önermektedirler. Çalışmalarında ortaokul öğrencilerinin akademik performanslarını Portekizce ve Matematik dersleri üzerinden sınıflandırma yöntemleri ile tahmin etmişlerdir. Tüm yöntemler Python programlama dilini kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. İlk etapta veri seti üzerinde ön işleme işlemi yapmışlardır. Veri setinde kategorik değerler içeren öznitelikler sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Veri setindeki dengesiz sınıf dağılımı için SMOTE yöntemi kullanmışlardır. Çalışmalarında kullanılan rastgele arama algoritması ile YSA modelinde kullanılacak en uygun hiperparametre setini belirlemişlerdir. Modelde sigmoid, ReLU ve Softmax aktivasyon fonksiyonları kullanmışlardır. Kayıp fonksiyonu olarak binary\_crossentropy ve sparse\_categorical\_crossentropy kullanmışlardır. Optimizasyon fonksiyonu olarak RMSProp kullanmışlardır. Modeli değerlendirmek için



performans ölçütleri olan doğruluk, kesinlik, f-ölçüsü ve duyarlılık değerlerini kullanmışlardır. Algoritmanın başarısı hem öznitelik seçim işlemi olmadan tüm veri seti ile hem de öznitelik seçim işlemi ile indirgenen veri setleri ile sınıflandırma yapılarak tüm sonuçları değerlendirmişlerdir. Öznitelik seçme işlemi için öz yinelenmeli özellik çıkarma ve filtreleme yöntemleri kullanmışlardır. Öğrencilerin Portekizce ve Matematik derslerindeki başarıları 2-seviyeli ve 5-seviyeli sınıflandırma tekniği ile önerilen algoritma kullanılarak tahmin edilmektedir. Deney sonuçlarında, önerilen algoritma ile Matematik dersi için doğruluk değerleri 2-seviyeli için %97 ve 5-seviyeli sınıflandırma için doğruluk değerleri %92.3 elde edilmektedir. Portekizce dersi için ise bu değerler 2-seviyeli için %97.6 ve 5-seviyeli sınıflandırma için %87.9 olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak öznitelik sayısı arttıkça doğruluğun çok az fark ile değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Tüm modellerde 10 kat çapraz doğrulama uygulanmıştır. Rastgele arama algoritması ile YSA modelinin hiper-parametreleri optimize edildiğinde hem Portekizce hem de Matematik dersi için oluşturulan veri seti üzerinde yapılan 2-seviyeli ve 5-seviyeli sınıflandırma sonuçlarının iyileştiğini gözlemlemişlerdir [45].

Özkan ve arkadaşları (2018) öğrencilerin akademik başarısının değerlendirilmesinde bir döneme ilişkin akademik performansları; demografik, sosyal ve çevreyle ilgili diğer bazı özelliklerine ilişkin veriye dayanarak, yapay zekâ algoritmaları yardımıyla modellenmesini ve öngörülerin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Çalışmalarında UCI Machine Learning Repository’de erişime açık olan “student performance” veri setini kullanmışlardır. Veri seti, Portekiz’de bir ortaöğretim okulunda 395 öğrencinin bilgilerini içermektedir. Veri kümesinde 33 öznitelik yer almaktadır. Model performans geçermesi için veri kümesinin tesadüfi olarak %90’ı modellerin eğitimi, kalan %10 ise test amacıyla ayırmışlardır. Eğitim verisiyle birlikte C5, Boosted C5, Regresyon Ağaçları, SVM, LR, RF, Derin öğrenme algoritmaları kullanılmış ve modellerin kodlaması için R programlama dilinden yararlanmışlardır. Çalışmada özgün bir derin öğrenme modeli tasarlanmış ve bu modelde girdi ile çıktı katmanları haricinde üç adet gizli katman kullanılmıştır. Bu katmanlardaki sinir hücresi sayısı 256 olarak belirlenmiş aktivasyon fonksiyonu olarak da “ReLU” kullanılmıştır. Çıktı katmanında ise 20 sinir hücresine yer verilmiştir. Momentum oranı 0.9, öğrenme oranı ise 0.005 olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar, ağırlıkların başlangıç değerlerinin belirlenmesi için Xavier parametresini seçmişlerdir. Performans değerlendirmek için doğruluk ölçütünü dikkate almışlardır. Farklı algoritmalar ile oluşturulan sınıflandırma modellerinin test verisine uygulanması sonucunda C5.0 ile 0.86, Boosted C5 ile 0.82, Regresyon Ağaçlarıyla 0.84, SVM ile 0.78, LR ile 0.82, RF ile 0.84 ve derin öğrenme ile 0.87 doğruluk değerlerini elde etmişlerdir. Bu doğrultuda en uygun performansın derin öğrenme algoritmasıyla elde edildiğini belirtmişlerdir. Derin öğrenme modelini oluşturan özniteliklerden önem derecesi en yüksek öznitelikler sırasıyla “ailesi ile olan ilişki seviyesi, arkadaşlarıyla dışarı çıkışları ve annesinin eğitim durumunun en etkili değişkenler” olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçla aile içi ilişkilerdeki seviyenin öğrenci performansı üzerindeki etkisini vurgulamaktadırlar [46].

Punlumjeak ve Rachbure (2015) çalışmalarında, bir sınıflandırma modeli uygulanmadan önce, en önemli özellikleri bulmak için veri ön işleme sürecinde özellik seçim yöntemi kullanılmasını önermişlerdir. Çalışmada kullanılan veriler, Rajamangala Teknoloji Üniversitesi Thanyaburi, Pathumthani, Tayland Mühendislik Fakültesi’nden 2004-2010 yılları arasında toplanmıştır. 463,956 kayıt, öğrenci kimliğine göre 6,882 kayıt olarak gruplandırılmıştır. Veri seti sadece birinci sınıf öğrencisi ve öğrencinin kabul verileri vardır. Veri seti 15 öznitelikten oluşmaktadır. Bu çalışmada, veri temizleme ve veri dönüştürme işlemi yapıldıktan sonra dört öznitelik seçme yöntemi kullanılmıştır. Bunlar; Genetik algoritmalar, SVM, IG ve her yöntem için minimum özellik kümesini bulmak için mRMR’dir. Daha sonrasında NB, DT, KNN ve YSA ile sınıflandırmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, sınıflandırıcıların doğruluğunu değerlendirerek her bir öznitelik seçim yönteminin performansını her bir sınıflandırma tekniği ile karşılaştırmışlardır. Doğru bir tahmin modeli için 10 kat çapraz doğrulama (Cross Validation) kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar, 10 öznitelik seçilerek mRMR öznitelik seçim yönteminin KNN sınıflandırıcı ile %91.12 doğrulukla en iyi sonucu verdiğini göstermektedir. Mevcut çalışmanın sonucu, minimum ve anlamlı özellik bulmak için gelecekteki seçim avantajının öğrenci performansını sınıflandırmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan yazılım RapidMiner Studio sürüm 6.40’tır [47].

Yakupoğlu (2018) tez çalışmasında ilgili okulda öğretmenin verdiği kararlar yürütülen, öğrencilerin 5 ana ders üzerindeki yetkinlik sınıflarına atanması işlemi, sınıflandırma algoritmalarıyla otomatikleştirilmeye çalışılmıştır. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı'na bağlı özel bir okulda, orta öğretim 5., 6. ve 7. sınıf öğrencilerine ait veri setleri üzerinde eğitimsel veri madenciliğinin bir uygulaması yapılmıştır. Çalışma, 2015-2018 yılları arasındaki üç akademik yıl boyunca ortaokul seviyesinde öğrenim görmüş öğrencileri kapsamaktadır. Öğrenciye ait demografik bilgiler, aile bilgileri, sağlık bilgileri, öğrencinin tutum ve davranışına yönelik bilgiler ve akademik başarısını ve gayretini gösteren bilgiler yer almaktadır. Veri setinde 79 adet öznitelik vardır. Tüm veri seti kullanılarak öğrencilerin Matematik, Türkçe, Sosyal Bilgiler ve İngilizce dersleri olan üzere 5 ana ders üzerindeki yetkinlik sınıfları 4 farklı makine öğrenmesi algoritmasıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları C4.5 Karar ağacı, MLP, KNN ve SVM algoritmasıdır. Yapılan ilk deneyde, veri seti üzerinde herhangi bir ön işleme çalışması yapılmadan algoritmaların gösterdiği performanslar incelenmiştir. Veri ön işleme öncesi yapılan bu analizde, C4.5 ve SVM algoritmaları, MLP ve KNN algoritmalarına göre daha yüksek performans göstermiştir. Bir sonraki deneyde veri setindeki gürültülü ve eksik veriler temizlenerek veri ön işleme yapılmıştır. 2 farklı öznitelik seçme yöntemi uygulanmıştır. İlk yöntemde C4.5 algoritmasına göre daha az açıklayıcı değişkenler modelden çıkartılarak değişken sayısı azaltılmıştır. İndirgenen veri seti ile kurulan modellerden SVM algoritması dışında diğer algoritmalarda kayda değer bir başarı sağlanamamıştır. İkinci yöntemde WEKA özellik seçimi ile değişkenler belirlenmiştir. Tahmin edilen sınıflar üzerinde 0.1 korelasyon değerinin altında kalan değişkenlerin modelden çıkartılması yoluyla değişkenler azaltılmıştır. Tüm sınıflandırma algoritmalarının performans değerleri, kayda değer oranlarda yükselmiştir [48].

Kumar ve arkadaşları (2022) yaptıkları çalışmada eğitim kurumlarındaki öğrencilerin başarısının öğrenmesiyle ilgili herhangi bir örüntü keşfedilir ve doğru bir şekilde analiz edilirse gelecekte öğrencilerin akademik performansını artırmasına yardımcı olacağını savunmaktadırlar. Veri setinin birçok özellik içereceğini, ancak tüm bu özelliklerin veri kümesindeki modeli tahmin etmek için önemli olmadığını belirtmişlerdir. Öznitelik seçim tekniğini uygulayarak önemli olmayan özellikleri kaldırmak gerektiğini belirtmişlerdir. Öznitelik seçim yöntemlerinden CFS, IG ve GR özneliği değerlendiricisini kullanarak, öğrenci verilerindeki en önemli özellikleri tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, öğrenci tahminini tahmin etmek için halka açık iki veri seti kullanılmıştır. Öğrencilerin notlarının yanı sıra kişisel, ders dışı etkinliklere katılım ve demografik özellikleri ile ilgili verileri içerir. Tüm veriler okul raporları ve anketler kullanılarak toplanmıştır. İlk veri seti (395 kayıt), bir matematik dersindeki öğrenci performansına ilişkin verileri içerirken, ikinci veri seti (649 kayıt) bir Portekizce dil dersinden öğrenci performansına ilişkin verileri içerir. Her ikisinde de toplam 33 öznitelik bulunmaktadır. Çalışmalarında, sınıflandırma algoritmaları ile farklı öznitelik seçim yöntemleri arasındaki etkiyle bir karşılaştırma yapmışlardır. Sınıflandırma algoritmaları olarak NB, RF, DT, MLP ve Karar tablosu teknikleri kullanılmıştır. Öznitelik seçim teknikleri kullanmadan yapılan modellerde en yüksek başarıyı %80 doğruluk oranıyla Karar tablosu teknikleri verirken, öznitelik seçim teknikleri uygulandıktan sonra tüm sınıflandırma algoritmalarında doğruluk oranında %2 ile %6 arasında artış gözlemlenmiştir. %83.33 doğruluk oranıyla en yüksek başarıyı öznitelik seçim tekniklerinden bilgi kazanım özneliği değerlendiricisi uygulandıktan sonra kurulan Karar tablosu tekniklerinin verdiği belirtilmiştir [49].

Ramaswami ve Bhaskaran (2009) ortaokul öğrencilerine ait kişisel bilgi, sosyal çevre ve akademik bilgiler içeren verileri kullanarak öğrencilerin akademik başarı durumlarının tahmin edilmesini hedeflemektedirler. Veri setinde 1,969 kayıt ve 32 bağımsız öznitelik vardır. Çalışmalarında farklı öznitelik seçim yöntemleri kullanarak 6 adet indirgenmiş veri seti oluşturmuşlardır. Her bir veri seti ile modeller oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öznitelik seçim yöntemi olarak; CFS, Ki-kare, GR, IG, SU ve Rahatlama öznitelik değerlendirme yöntemlerini kullanmışlardır. Modelleme için 4 farklı sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Bunlar NB, VotedPerceptron, OneR ve PART algoritmalarıdır. Dört sınıflandırıcının hepsi de IG niteliği tarafından oluşturulan özellik alt kümesi için iyi performans göstermiştir. OneR yöntemi %89'dan fazla olan

yüksek tahmin doğruluğu göstermiştir. Özellikle OneR tüm özellik alt kümeleri için sürekli olarak aynı düzeyde tahmin performansı sağladığı görülmüştür. Modellerin performansını değerlendirmek için Doğruluk, F-skoru ve ROC eğrisi kullanılmışlardır. Tüm modeller WEKA programında kurulmuştur [50].

Uzel ve arkadaşları (2018) öğrencilerin akademik başarısını önceden tahmini etmeyi ve başarıya etkisi fazla olan özellikleri belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında birliktelik kuralları ve sınıflandırma yöntemlerini aynı anda uygulamışlardır. Kullanılan veri seti ilköğretim ve ortaöğretim seviyesindeki öğrencilere aittir. Veri seti 480 öğrenciye ait 16 öznitelikten oluşmaktadır. Sınıflandırma için MLP, DT, RF, Oylama sınıflandırıcıları (OneR), NB ve YSA yöntemlerini kullanmışlardır. 10-kat çapraz katlama yönteminden yararlanmışlardır. Tüm uygulamalar WEKA yazılımında gerçekleştirilmiştir. Modellerin performanslarının değerlendirilmesi için karmaşıklık matrisi, doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F-skoru dikkate alınmıştır. En yüksek doğruluk oranı YSA ile kurulan modelden elde etmişlerdir. Bu modelden elde edilen doğruluk oranı %79.1 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hangi özelliklerin öğrencilerin akademik performanslarının artmasıyla daha fazla ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Veri setindeki özelliklerden öğrencinin okuldaki devamsızlığı, cinsiyeti, ek ders takviyesi alıp almadığı, ailenin okuldan memnuniyeti gibi özellikler akademik başarıyı en çok etkileyen etmenler olduğu belirtilmiştir [51].

Şengür (2013) tezinde Fırat Üniversitesinde öğrenim gören Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü öğrencilerinin tüm ders not bilgileri ile mezuniyet notlarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Böylece mezun olamayacak öğrenciler önceden bilenecek ve öğrencilere haber verilecektir. Aynı zamanda ortalaması belirli bir notun altında kalan öğrencileri uyarabileceğini ve önlem alınabileceğini belirtmiştir. 2011 yılında mezun olmuş 127 bölüm öğrencisinin 4 yıl içerisinde almış olduğu toplam 49 farklı dersin yılsonu notlarını kullanmıştır. Mezuniyet notu çıktı değişkendir ve 0-4 arası değerlerden oluşmaktadır. YSA ve DT algoritmaları kullanılarak diploma notu tahmin edilmiştir. Mezuniyet notunun tahmini için iki senaryo denemiştir. Senaryoları MATLAB ortamında gerçekleştirmiştir. İlk senaryoda, öğrencilerin birinci ve ikinci sınıfa ait derslerinin yılsonu notları kullanılarak mezuniyet notunu tahmin etmiştir. İkinci senaryo da ise mezuniyet notlarının tahminini ilk üç sınıf notları ile gerçekleştirmiştir. Başarı değerlendirmesi için korelasyon katsayısı ve ortalama kare hata fonksiyonları (OKH), modelin performansını daha etkili değerlendirmek için ortalama mutlak hata (OMH) yöntemini kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarında YSA'nın, DT algoritmasına göre daha iyi tahmin sonucu elde ettiğini ve ikinci senaryonun, birinci senaryoya göre daha iyi tahmin yaptığını belirtmiştir. İkinci senaryo için ortalama 7.2228 OKH değeri ve 0.2026 OKH değeri elde edilmiştir [52].

Zaffar ve çalışma arkadaşları (2018) çalışmalarında filtre öznitelik seçim algoritmalarının ve sınıflandırma algoritmalarının iki farklı öğrenci veri kümesi üzerindeki performansının analizini yapmışlardır. Birinci veri seti 16 öznitelik içeren 500 öğrenci kaydından oluşmaktadır. Veri setinde demografik, akademik ve davranışsal olmak üzere üç özellik kategorisi vardır. İkinci veri seti ise 24 öznitelik içeren 300 öğrenci kaydından oluşmaktadır. Veriler Hindistan'daki 3 farklı kolejden elde edilmiştir. Tüm modeller WEKA programının 3.9 sürümü kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada altı farklı öznitelik seçim algoritması kullanılmıştır. Bunlar CFS, Ki-kare, filtre, GR, Ana bileşenler ve ReliefF öznitelik seçim yöntemleridir. Öznitelik seçim yöntemleri ile veri seti indirgenerek yeni veri setleri oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setleriyle sınıflandırma modelleri kurulmuştur. DT, J48, RF, Rastgele ağaç, Bayesian Network, NB, NaiveBayesUpdateable, MLP, Basit Lojistik, SMO, Karar tablosu, OneR, Jrip, REPTree olmak üzere on beş sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. 2 farklı veri setinde kullanılan öznitelik seçim yöntemlerinin önemli performans farkı olduğunu belirtmişlerdir. Doğruluk yüzdelerinde %10 ile %20 fark olduğu gözlemlenmiştir. Filtre öznitelik seçim yöntemlerinin performansı, öznitelik sayısı arttıkça düşmektedir. Bu sebeple çok sayıda öznitelik sayısına sahip olan öğrencinin akademik performansını tahmin etmek için sarmalayıcı özellik seçme teknikleri de değerlendirilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Birinci veri seti üzerinde uygulanan Ki-kare seçim teknikleri ile MLP algoritmasının %77 ile en yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. İkinci veri seti için Ki-

kare özellik seçim yöntemleri ile Bayes Net sınıflandırma algoritması birlikte kullanıldığında %62 elde edilerek en yüksek doğruluk oranı sağladığı görülmüştür [53].

Acharya ve Sinha (2014) çalışmalarında yükseköğretimde öğrenim gören öğrencilerin kişisel bilgileri, sosyal çevre bilgileri, sosyo-ekonomik bilgileri, daha önceki okuluna ait mezuniyet bilgileri gibi verileri kullanılarak 2. dönem notlarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Veri setinde 413 öğrenciye ait 34 adet bağımsız nitelik bulunmaktadır. Bağımlı nitelik 6 seviyeli olup kategorik bir yapıya sahiptir. Veri seti üzerinde öznelik seçim yöntemleri kullanarak başarıya en çok etki eden 8 bağımsız nitelik belirlenmiştir. İndirgenen veri seti ile farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak tahmin modelleri oluşturmuşlardır. Bu algoritmalar NB, DT, MLP ve KNN algoritmalarıdır. En başarılı model DT algoritmaları ile elde edilmiştir. Ailenin ekonomik durumu, 1. dönem not ortalaması, ortaöğretim not ortalaması, okula devamsızlığı, hangi dine mensup olduğu, sosyal çevre ve ortaöğretim okul türü niteliklerinin başarıyı önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir [54].

Cortez ve Silva (2008) ortaokul öğrencilerinin akademik başarılarının tahminine yönelik regresyon ve sınıflandırma modelleri oluşturmuşlardır. Çalışmada 2 farklı veri seti kullanmışlardır. Matematik veri setinde 395 kayıt, Portekizce veri setinde ise 649 kayıt mevcuttur. Her 2 veri setinde de 32 bağımsız nitelik mevcuttur. Bu nitelikler öğrencilerin sosyo-ekonomik, demografik, bir önceki döneme ait dönem not bilgilerini içerir. Bağımlı nitelik diye isimlendirilen hedef nitelikleri ise Portekizce ve Matematik derslerinin yılsonu not ortalamalarıdır. Not ortalamaları 2 seviyeli ve 5 seviyeli olmak üzere 2 çeşittir. Makine öğrenmesi algoritmalarından DT, SVM, RF ve YSA algoritmaları kullanılarak modeller kurulmuştur. Modeller R programlama dili kullanılarak uygulanmıştır. Çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak veriyi bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Model performans değerlendirmesi için karmaşıklık matrisi ve doğruluk ölçütü kullanmışlardır. Oluşturulan tahmin modellerin performans sonuçlarına göre Portekizce dersi için en yüksek performansı DT algoritması, Matematik dersi için en yüksek performansı NB algoritması ile elde etmişlerdir. Başarıyı en fazla etkileyen özellikler anne ve babanın eğitim durumu, alkol tüketimleri, meslekleri ve öğrencinin geçmiş dönem not bilgileri olduğu belirlenmiştir [55].

#### 4. Tartışma (Discussion)

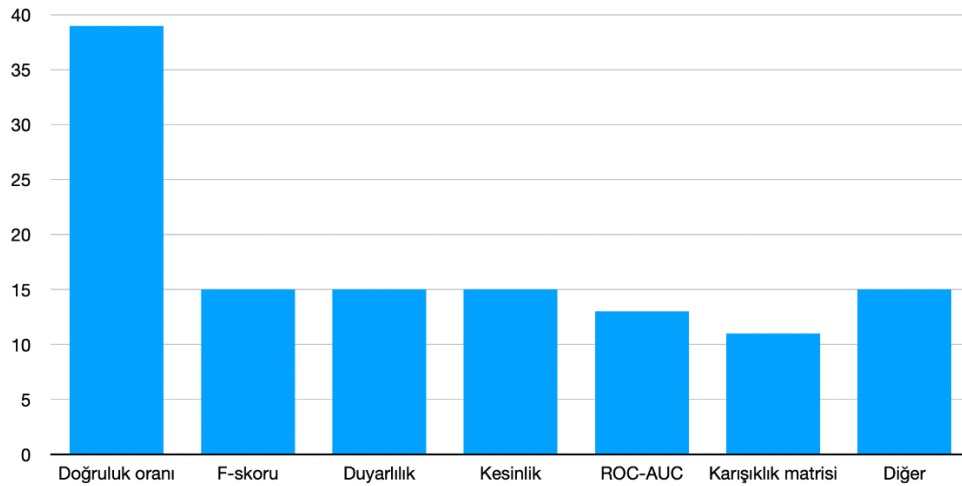
Bu bölümde, incelenen çalışmalarla ilgili özet bilgiler sunularak en başarılı modeller, en çok kullanılan yöntemler ve algoritmalar ile araştırmanın araçları ile ilgili bilgiler verilmiştir. İncelenen çalışmalarda öznelik seçim teknikleri kullanılan ve sınıflandırmada en başarılı 10 modellerin başarı oranları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. En başarılı 10 modelin analizi (Analysis of the 10 most successful models)

Çalışma	Öznelik Seçim Tekniği	Model	Başarı Oranı (Doğruluk %)
[18]	IG	YSA	%98.6
[21]	IG	RF	%75.52
[38]	IG, CFS, GR	DT	%85 - %91
[43]	Select K-Best	Boosting	%75
[44]	FSA	LR	%90
[47]	mRMR	KNN	% 91.12
[48]	CFS	SVM	%85.5
[49]	IG	Karar Tablosu	%83.33
[50]	IG	OneR	%89
[53]	Chi-Square	MLP	%77

Bu çalışmada öğrencilerin akademik başarılarının önceden tahmin edilmesi veya sınıflandırılması, veri setindeki gereksiz veya sonucu aynı etkileyen özelliklerin tespiti ile ilgili ulusal ve uluslararası alanlarda yayınlanmış olan çalışmalar araştırılmıştır. İncelenen çalışmalarda bazılarında öznelik seçim teknikleri kullanılmış bazılarında ise kullanılmamıştır.

Literatürde kullanılan öznitelik seçim teknikleri ve sınıflandırma algoritmalarının istatistikleri de analiz edilmiştir. Yapılan 39 çalışmada en fazla kullanılan algoritmanın NB algoritması olduğu, en fazla kullanılan öznitelik seçim tekniklerinin de filtreleme yöntemlerinden IG öznitelik seçim tekniği olduğu görülmektedir. IG öznitelik seçim tekniği kullanılan Tablo 2'deki çalışmalar incelendiğinde başarı oranlarının %75.52 ile %98.6 arasında değiştiği görülmektedir. İncelenen çalışmalardan 12 tanesinde IG öznitelik seçim tekniği, 8 çalışmada CFS, 5 çalışmada GR, 4 çalışmada Ki-kare (Chi-Square), 3 çalışmada Genetik algoritma öznitelik seçim tekniği kullanılmıştır. Select k-best, rastgele n sınıflandırıcısı, mRmR, Simetrik belirsizlik, ANOVA, Karşılıklı Bilgi, Hibrit modeller, Geri yönlü emilasyon, Relief, Ana bileşenler öznitelik seçim teknikleri de kullanılan tekniklerdir. Sınıflandırma algoritmaları sırasıyla 19 çalışmada NB, 17 çalışmada DT, 15 çalışmada RF, 13 çalışmada YSA, 13 çalışmada LR, 11 çalışmada KNN, 10 çalışmada SVM, 9 çalışmada MLP, 4 çalışmada Boosting algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaların haricinde J48, Bayes net, Cart, CS5, Chaid, Derin öğrenme, REPTree, OneR, Karar Tabloları ve Çoklu Regresyon algoritmaları da kullanılmış Kural Tabanlı Algoritma ise bir çalışmada kullanılmıştır. Çalışma ortamları incelendiğinde WEKA programının yoğun olarak kullanıldığı görülmüştür. Kullandıkları ortamları belirten çalışmalar içerisinde en çok kullanılan geliştirme ortamı sırası ile WEKA (14), Rapid Miner (5), SPSS (3), Python-Scikit Learn (5), R-Studio (4), MATLAB (2), Orange (2) şeklindedir. Modellerin performansını değerlendirmek için en çok kullanılan ölçüt doğruluk oranıdır. Literatür incelemesinde doğruluk oranından faydalanan çalışma sayısı 39'dur. Diğer değerlendirme ölçütlerinin kullanım sayıları; F-skoru (15), duyarlılık (15), kesinlik (15), ROC-AUC (13), karışıklık matrisi (11)'dir. Kappa skoru, OKH, OMH, RMSE, MSE gibi metrikler, çalışmalarda kullanılan diğer değerlendirme ölçütleridir. Kullanılan ölçütlere ait grafik Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Çalışmalarda kullanılan değerlendirme ölçütleri  
(Evaluation criteria used in the studies)

Son olarak literatür incelemesi sırasında öznitelik seçimi algoritmalarını uygulayan çalışmalardaki öznitelik sonuçlarına bakılmıştır. Araştırmalarda kullanılan veri setlerinde, öznitelik seçim işlemlerinden sonra belirlenerek kullanılan temel öznitelikler incelenmiştir. Farklı çalışmalarda farklı veri setleri kullanılmasına rağmen, bu araştırmalardaki performansı etkileyen temel öznitelikler şöyle özetlenebilir: anne ve babanın eğitim düzeyleri, öğrencilerin daha önce aldığı eğitim kalitesi, öğrencilerin okul dışı aldıkları kurs, ailenin gelir düzeyi, anne ve babanın eğitim durumu ve öğrencinin sağlık durumu. Bu öznitelikler, farklı araştırmalarda ortak olarak kullanılan ve akademik performansı en çok etkileyen temel kriterler olarak bulgular arasında yer almaktadır.

## 5. Sonuç (Conclusion)

Eğitim, toplumların ilerlemesinde hayati önem taşımaktadır. Eğitim sistemlerinde yer alan her öğrenci kendine özgü ihtiyaçlara ve öğrenme tarzlarına sahiptir. Eğitim sistemleri ise bu çeşitliliği etkili bir şekilde



yönetebilme konusunda zorluklarla karşı karşıyadır. Son yıllarda makine öğrenimi teknolojilerinin eğitimde kullanımı, öğrenci performansının değerlendirilmesi ve akademik başarının artırılması için önemli bir araç olarak ortaya çıkmıştır.

Makine öğrenmesi teknikleri, öğrencilerin bireysel ihtiyaçlarını ve öğrenme stillerini daha iyi anlamak ve onlara özelleştirilmiş bir eğitim deneyimi sunmak için kullanılabilir. Böylece makine öğrenmesi teknikleriyle öğrencilerin potansiyelleri daha iyi ortaya çıkarılabilir. Ek olarak eğitim politikalarının geliştirilmesi ve eğitim programlarının etkinliğinin değerlendirilmesi için de kullanılarak eğitim sistemlerinin daha verimli ve etkili hale getirilmesine yardımcı olabilir. Makine öğrenmesi teknikleri özellikle öğrencilerin akademik zorluklarla karşılaşabileceği alanları belirlemek ve erken müdahale sağlamak için kullanılabilir. Öğrencilerin bireysel öğrenme hızlarına ve kapasitelerine göre zorlanabilecekleri alanlar erken müdahale kapsamında daha farklı öğretim yöntem ve teknikleriyle anlatılabilir. Konu tekrarları, ek sınavlar ve geribildirim mekanizmaları planlanarak öğrenmeler pekiştirilebilir. Böylece öğrencilerin başarısız olmaları engellenebilir ve akademik başarıları artırılabilir. Makine öğrenmesi teknolojilerinin eğitimde kullanımı bazı zorluklar ve endişeleri de beraberinde getirebilir. Öğrenci verilerinin toplanması ve kullanılması, gizlilik ve etik endişelere yol açabilir. Bu verilerin nasıl kullanılacağı, kimin erişebileceği ve nasıl korunacağı gibi konuları baş edilmesi gereken unsurlardan biridir. Teknolojilere eşit erişim sağlamak da önemlidir çünkü erişimdeki eşitsizlikler, teknolojilerin etkisini azaltabilir ve eşitsizlikleri derinleştirebilir.

Bu potansiyellerden yola çıkarak bu çalışmada öğrencilerin akademik başarılarını makine öğrenmesi algoritmaları ve özellik seçim teknikleriyle değerlendiren çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan teknikler ve algoritmalar bir araya getirilmiştir. Çalışmalar sonuçları bakımında da irdelenmiş, bulguları sunulmuştur. Ayrıca yıl bazında çalışma sayıları ve kullanılan araçlarla ilgili içgörüler oluşturmak amaçlı bilgiler de verilmiştir. Bu yönleriyle çalışmanın gelecekteki araştırmalara kapsamlı bir analiz noktası oluşturacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın literatüre katkıları gelecek çalışmaların başlangıç noktası olması açısından da önem az etmemektedir.

Gelecekteki çalışmalar makine öğrenmesinin eğitimde kullanımı açısından pek çok potansiyeli barındırmaktadır. Bu çalışmalarda makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak, öğrencilerin bireysel ihtiyaçlarını daha iyi karşılayacak kişiselleştirilmiş öğrenme modelleri geliştirilebilir. Gelecekteki araştırmalar, bu modellerin etkinliğini ve uygulama yöntemlerini de inceleyebilir. Buna ek olarak farklı araştırmalarda daha sıkı gizlilik ve etik protokoller geliştirmeye odaklanılabilir. Verilerin nasıl korunacağı, kimin erişebileceği ve bu verilerin etik kullanımı konularında rehberlik edecek politikalar oluşturabilir. Ayrıca öğrencilerin akademik zorluklarla karşılaşabilecekleri alanları belirlemek ve erken müdahale sağlamak için gelecekteki çalışmalar, bu erken müdahale mekanizmalarının nasıl daha etkili hale getirilebileceğini ve hangi öğretim yöntemlerinin en iyi sonuçları verdiğini araştırabilir. Öğrenci performansını değerlendiren ve akademik başarıyı artıran makine öğrenimi algoritmalarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar da devam etmelidir. Bu çalışmalar, mevcut algoritmaların iyileştirilmesi, yeni algoritmaların geliştirilmesi ve bu algoritmaların eğitim ortamında nasıl uygulanabileceği konularında derinlemesine analizler yapabilir. Uzun vadeli etki çalışmaları da bir diğer önemli araştırma alanı olabilir. Bu araştırmalar, bu tekniklerin öğrencilerin kariyerleri üzerindeki etkilerini ve uzun vadeli eğitim çıktılarındaki değişiklikleri değerlendirebilir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] B. Aslan and M. C. Babadoğan, "Relationships between learning style preferences and gender, age and success level at 7th and 8th Grade," *Eurasian Journal of Educational Research*, vol. 21, pp. 35-48, 2005.
- [2] R. R. F. Mendes, F. B. de Voznika, A. A. Freitas, and J. C. Nievola, "Discovering Fuzzy Classification Rules with Genetic Programming

and Co-evolution,” in *Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, L. De Raedt ve A. Siebes, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 314-325, 2001.

[3] M. Ünver, E. Erdal, and A. Ergüzen, “Big Data Example In Web Based Learning Management Systems,” *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 39-42, 2018.

[4] S. Buyrukoğlu, “A novel color labeled student modeling approach using e-learning activities for data mining,” *Univers Access Inf Soc*, vol. 22, no. 2, pp. 569-579, June 2023. doi:10.1007/S10209-022-00894-8/TABLES/7

[5] A. Peña-Ayala, “Educational data mining: A survey and a data mining-based analysis of recent works,” *Expert Syst Appl*, vol. 41, no. 4, pp. 1432-1462, March 2014. doi:10.1016/J.ESWA.2013.08.042

[6] B. G. Emiroglu and S. Sahin, “Analysis of Students’ Performances during Lab Sessions of Computer Networks Course,” *J Educ Techno Soc*, vol. 16, no. 3, pp. 329-346, 2013.

[7] R. Bütüner and M. H. Calp, “Estimation of the Academic Performance of Students in Distance Education Using Data Mining Methods,” *International Journal of Assessment Tools in Education*, vol. 9, no. 2, pp. 410-429, June 2022. doi:10.21449/IJATE.904456

[8] S. Kayalı and S. Buyrukoğlu, “Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Öğrencilerin Akademik Performanslarının Sınıflandırılması,” in *2nd International Conference On Educational Technology And Online Learning-ICETOL*, pp. 330, 2022

[9] S. Buyrukoglu, F. Batmaz, and R. Lock, “Semi-Automatic Assessment Approach to Programming Code for Novice Students,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2016)*, pp. 289-297, 2016

[10] İ. Yücedağ and O. Güler, “Fuzzy Logic Based Approach to Site Selection Problem of Vocational Secondary School Students,” *Hacettepe University Journal of Education*, vol. 32, no. 1, pp. 111-122, 2017.

[11] S. Agarwal, G. N. Pandey, and M. D. Tiwari, “Data Mining in Education: Data Classification and Decision Tree Approach,” *International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, vol. 2, no. 2, pp. 140-144, 2012. doi:10.7763/IJEEEE.2012.V2.97

[12] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*. in *Springer Series in Statistics*. New York, NY: Springer New York, 2009. doi:10.1007/978-0-387-84858-7

[13] E. Alyahyan and D. Düştögör, “Predicting academic success in higher education: literature review and best practices,” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 17, no. 1, pp. 1-21, December 2020. doi:10.1186/S41239-020-0177-7/TABLES/15

[14] A. Hellas et al., “Predicting academic performance: A systematic literature review”, in *Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education, ITiCSE, Association for Computing Machinery*, pp. 175-199, July 2018. doi:10.1145/3293881.3295783

[15] B. Albreiki, N. Zaki, and H. Alashwal, “A Systematic Literature Review of Student’ Performance Prediction Using Machine Learning Techniques”, *Educ Sci (Basel)*, vol. 11, no. 9, 2021. doi:10.3390/educsci11090552

[16] S. Savaş and S. Karataş, “Cyber governance studies in ensuring cybersecurity: an overview of cybersecurity governance,” *International Cybersecurity Law Review*, vol. 3, pp. 7-34, 2022. doi:10.1365/s43439-021-00045-4

[17] M. Altun, K. Kayıkçı ve S. Irmak, “Sınıf Öğretmenliği Öğrencilerinin Mezuniyet Notlarının Regresyon Analizi ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleriyle Tahmini,” *e-Uluslararası Eğitim Araştırmaları Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 29-43, 2019. doi:10.19160/ijer.624839

[18] M. Yıldız and C. Börekci, “Predicting Academic Achievement with Machine Learning Algorithms,” *Journal of Educational Technology and Online Learning*, vol. 3, no. 3, pp. 372-392, 2020. doi:10.31681/jetol.773206

[19] F. Ahmad, N. H. Ismail, and A. A. Aziz, “The prediction of students’ academic performance using classification data mining techniques,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 9, no. 129, pp. 6415-6426, 2015. doi:10.12988/AMS.2015.53289

[20] S. Hussain, N. A. Dahan, F. M. Ba-Alwi, and N. Ribata, “Educational Data Mining and Analysis of Students’ Academic Performance Using WEKA,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 9, no. 2, pp. 447-459, February 2018. doi:10.11591/IJEECS.V9.I2.PP447-459

[21] A. A. Saa, M. Al-Emran, and K. Shaalan, “Mining Student Information System Records to Predict Students’ Academic Performance,” in *The International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications (AMLTA2019)*, A. E. Hassanien, A. T. Azar, T. Gaber, R. Bhatnagar, and M. F. Tolba, Ed., Cham: Springer International Publishing, pp. 229-239, 2020.

[22] E. Fernandes, M. Holanda, M. Victorino, V. Borges, R. Carvalho, and G. Van Erven, “Educational data mining: Predictive analysis of academic performance of public school students in the capital of Brazil,” *J Bus Res*, vol. 94, pp. 335-343, January 2019. doi:10.1016/J.JBUSRES.2018.02.012

[23] S. Aydın and A. E. Özkul, “Data Mining and An Application in Anadolu University Open Education System,” *Journal of Research in Education and Teaching*, vol. 4, no. 3, pp. 36-44, 2015.

[24] P. Sökkhey and T. Okazaki, “Developing Web-based Support Systems for Predicting Poor-performing Students using Educational

- Data Mining Techniques,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 7, pp. 23-32, 2020. doi:10.14569/IJACSA.2020.0110704
- [25] H. A. Mengash, “Using data mining techniques to predict student performance to support decision making in university admission systems,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55462-55470, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2981905
- [26] F. Çifçi, C. Kaleli, and S. Günel, “Predicting Instructor Performance by Feature Selection and Machine Learning Methods,” *Anadolu Journal of Educational Sciences International*, vol. 8, no. 2, pp. 419-440, August 2018. doi:10.18039/AJESI.454587
- [27] V. S. R. Kumari, S. Veesa, and S. R. Chevala, “An Efficient Comparison Neural Network Methods to Evaluate Student Performance,” *GRD Journal for Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 4-7, 2020.
- [28] P. Kaur, M. Singh, and G. S. Josan, “Classification and Prediction Based Data Mining Algorithms to Predict Slow Learners in Education Sector,” *Procedia Comput Sci*, vol. 57, pp. 500-508, January 2015. doi:10.1016/j.PROCS.2015.07.372
- [29] H. S. Yıldız Aybek and M. R. Okur, “Predicting Achievement with Artificial Neural Networks: The Case of Anadolu University Open Education System,” *International Journal of Assessment Tools in Education*, vol. 5, no. 3, pp. 474-490, September 2018. doi:10.21449/IJATE.435507
- [30] Ö. Özbay and H. Ersoy, “Analysis of Student Dynamism into Learning Management System through Data Mining Methods,” *GUJGEF*, vol. 37, no. 2, pp. 523-558, August 2017.
- [31] A. Baltacı, “The Data Mining: Measurement of Academic Achievement in Faculty of Divinity Students by Data Mining,” *Religion and Science-the Journal of the Faculty of Islamic Sciences of The University of Mus Alparslan University*, vol. 1, no. 1, pp. 1-23, June 2018.
- [32] S. Hazel Başer, O. Hökelekli, and K. Adem, “Predicting the Performance of Students Studying in Secondary Education Using Data Mining Methods,” *Journal of Computer Science and Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 22-27, June 2020.
- [33] Ş. Can, T. Özdil, and C. Yılmaz, “Estimation of The Factors Affecting the Success of The University Students By Logistic Regression Analysis,” *International Review of Economics and Management*, vol. 6, no. 1, pp. 28-49, April 2018. doi:10.18825/IREMJOURNAL.349984
- [34] V. B. Gladshiya and K. Sharmila, “An Efficient Approach of Feature Selection and Metrics for Analyzing the Risk of the Students Using Machine Learning,” *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation, ICAECA 2021*, 2021. doi:10.1109/ICAECA52838.2021.9675507
- [35] B. Abbasoğlu, “Prediction of Academic Achievements of Secondary School Students with Educational Data Mining Methods,” *Veri Bilimi Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- [36] S. Aghalarova and S. Bozkurt Keser, “Application of AutoML Technique for Predicting Academic Performance of Students,” *El-Cezeri*, vol. 9, no. 2, pp. 394-412, May 2022. doi:10.31202/ECJSE.946505
- [37] E. Aydemir, “Forecasting of The Course Learning Notes by Data Mining Methods,” *European Journal of Science and Technology*, vol. 15, pp. 70-76, March 2019. doi:10.31590/EJOSAT.518899
- [38] M. K. Assistant, N. Nidhi, S. Majithia, and N. Sharma, “Predictive Model for Students’ Academic Performance Using Classification and Feature Selection Techniques,” *Proceedings - 2021 2nd International Conference on Computational Methods in Science and Technology, ICCMST 2021*, pp. 106-111, 2021. doi:10.1109/ICCMST54943.2021.00032
- [39] S. Bhutto, I. F. Siddiqui, Q. A. Arain, and M. Anwar, “Predicting Students’ Academic Performance Through Supervised Machine Learning,” *ICISCT 2020 - 2nd International Conference on Information Science and Communication Technology*, February 2020. doi:10.1109/ICISCT49550.2020.9080033
- [40] K. Karthikeyan and P. Kavipriya, “On Improving Student Performance Prediction in Education Systems using Enhanced Data Mining Techniques,” *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 935-941, May 2017. doi:10.23956/IJARCSSE/SV7I5/0348
- [41] S. S. Shreem, H. Turabieh, S. Al Azwari, and F. Baothman, “Enhanced binary genetic algorithm as a feature selection to predict student performance,” *Soft comput*, vol. 26, no. 4, pp. 1811-1823, February 2022. doi:10.1007/S00500-021-06424-7/FIGURES/16
- [42] A. Mueen, B. Zafar, and U. Manzoor, “Modeling and Predicting Students’ Academic Performance Using Data Mining Techniques,” *International Journal of Modern Education and Computer Science*, vol. 8, no. 11, pp. 36, November 2016. doi:10.5815/IJMECS.2016.11.05
- [43] J. Gajwani and P. Chakraborty, “Students’ Performance Prediction Using Feature Selection and Supervised Machine Learning Algorithms,” in *International Conference on Innovative Computing and Communications*, A. and B. S. and H. A. E. and A. S. and J. A. Gupta Deepak and Khanna, Ed., Singapore: Springer Singapore, pp. 347-354, 2021.
- [44] R. Bertolini, S. J. Finch, and R. H. Nehm, “Enhancing data pipelines for forecasting student performance: integrating feature selection with cross-validation,” *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 18, no. 1, pp. 1-23, December 2021. doi:10.1186/S41239-021-00279-6/FIGURES/8
- [45] S. Aghalarova and S. Bozkurt Keser, “Prediction of Secondary School Students’ Academic Performance with Proposed Artificial Neural Networks Algorithm,” *Veri Bilimi*, vol. 4, no. 2, pp. 19-32, August 2021.

- [46] Y. Özkan, F. Önay Koçoğlu, and Ç. Selçukcan Erol, "Prediction of Student Performance By Deep Learning Algorithm," in *7th International Conference on "Innovations in Learning for the Future": Digital Transformation in Education*, S. Gülseçen, Ç. Selçukcan Erol, Z. Ayvaz Reis, and Gezer Murat, Ed., İstanbul: İstanbul University Press, pp. 136-144, 2018.
- [47] W. Punlumjeak and N. Rachburee, "A comparative study of feature selection techniques for classify student performance," in *7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Envisioning the Trend of Computer, Information and Engineering, ICITEE 2015, 29-30 Sept. 2015, Mai, Thailand*, 2015. pp. 425-429. doi:10.1109/ICITEED.2015.7408984
- [48] Y. Yakupoğlu, "Eğitimsel veri madenciliği ve bir uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [49] M. Kumar, Nidhi, B. Sharma, and D. Handa, "Building Predictive Model by Using Data Mining and Feature Selection Techniques on Academic Dataset," *International Journal of Modern Education and Computer Science*, vol. 14, no. 4, pp. 29, August 2022. doi:10.5815/IJMECS.2022.04.02
- [50] M. Ramaswami and R. Bhaskaran, "A Study on Feature Selection Techniques in Educational Data Mining," *J Comput*, vol. 1, no. 1, pp. 711, December 2009.
- [51] V. N. Uzel, S. S. Turgut, and S. A. Özel, "Prediction of Students' Academic Success Using Data Mining Methods," in *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference, ASYU 2018, Adana, Türkiye, 4-6 November 2018*, Buse Melis Ozyildirim, Tülay Yildirim, Eds. IEEE, 2018. doi:10.1109/ASYU.2018.8554006
- [52] D. Şengür, "Öğrencilerin akademik başarılarının veri madenciliği metotları ile tahmini," Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2013.
- [53] M. Zaffar, M. A. Hashmani, K. S. Savita, and S. S. H. Rizvi, "A Study of Feature Selection Algorithms for Predicting Students Academic Performance," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 5, pp. 541-549, 2018. doi:10.14569/IJACSA.2018.090569
- [54] A. Acharya and D. Sinha, "Early Prediction of Students Performance using Machine Learning Techniques," *Int J Comput Appl*, vol. 107, no. 1, pp. 37-43, December 2014. doi:10.5120/18717-9939
- [55] P. Cortez and A. Silva, "Using Data Mining to Predict Secondary School Student Performance," in *Proceedings of 5th Annual Future Business Technology Conference, Porto, Portugal, 9-11 Ap. 2008*, pp. 5-12.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Gazi University Social Transcript Information System Development and Usability Analysis

Zafer Ayaz<sup>a\*</sup>

Submitted: 30.10.2024 Revised: 09.12.2024 Accepted: 16.12.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR14

### ABSTRACT

**Keywords:** Social transcript, extracurricular activities, information system, usability analysis

<sup>a,\*</sup> Gazi University,  
Faculty of Applied Sciences,  
Dept. of Management Information  
Systems  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7667-7921  
e mail: zafer@gazi.edu.tr

\*Corresponding author:  
zafer@gazi.edu.tr

Nowadays, extracurricular activities are of great importance in addition to the courses taught in schools. Apart from focusing only on academic achievement, students try to increase their skills development, leadership, teamwork, and networking skills, which are also crucial for employers, by participating in social activities. This study aims to design and develop a "Social Transcript Information System" to record and document the social, cultural, scientific, and sportive activities of associate and undergraduate students enrolled at Gazi University. It is aimed to determine whether the system has reached the necessary maturity in the eyes of the users and to present suggestions for improvement with the usability analysis conducted after use. 71 students and 25 academic advisors participated in the research. In light of the data obtained, it was seen that the university should review the processes related to social activities and student organizations and make arrangements to increase student participation. In particular, it was concluded that improvements should be made in several areas, such as improving the methods of announcing events, organizing events equally on different campuses and the central campus, making the social transcript system more user-friendly, and improving students' perceptions of the scoring system.

## Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi Geliştirilmesi ve Kullanılabilirlik Analizi

### ÖZ

Günümüzde, okullarda verilen derslerin yanı sıra müfredat dışı etkinliklerin de büyük önemi vardır. Öğrenciler, yalnızca akademik başarıya odaklanmanın dışında sosyal etkinliklere katılarak işverenlerin işe alma süreçlerinde dikkate aldıkları liderlik, takım çalışması ve ağ oluşturma yeteneklerini artırmaya çalışmaktadır. Bu çalışmada, Gazi Üniversitesi'nde kayıtlı önlisans ve lisans öğrencilerinin sosyal, kültürel, bilimsel ve sportif faaliyetlerinin kayıt altına alınması ve belgelendirilmesi amacıyla "Sosyal Transkript Bilgi Sistemi"nin tasarlanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanım sonrası yapılan kullanılabilirlik analiziyle sistemin kullanıcılar nezdinde gerekli olgunluğa ulaşmadığının tespiti ve iyileştirme önerilerinin sunulması hedeflenmiştir. Araştırmaya 71 öğrenci ve 25 akademik danışman katılmış, elde edilen veriler ışığında üniversitenin sosyal faaliyetler ve öğrenci toplulukları ile ilgili süreçlerini gözden geçirmesi gerektiğini ve öğrencilerin katılımını artıracak şekilde düzenlemeler yapmasının önemi görülmüştür. Özellikle etkinliklerin duyurulma yöntemlerinin geliştirilmesi, merkez kampüste olduğu şekilde farklı kampüslerde de eşit şekilde etkinlik düzenlenmesi ve sosyal transkript sisteminin daha kullanıcı dostu hale getirilmesi, öğrencilerin puanlama sistemine yönelik algılarının iyileştirilmesi gibi birkaç alanda iyileştirmeler yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sosyal transkript, müfredat dışı aktiviteler, bilgi sistemi, kullanılabilirlik analizi



## 1. Giriş (Introduction)

Sınırların kalktığı ve rekabetin yoğunlaştığı günümüz dünyasında, nitelikli işgücü büyük bir önem taşımaktadır. Uluslararası pazarda rekabet edebilen örgütlerde çalışanlardan; teknolojiyi anlayabilme ve uygulayabilme, değişikliklere uyum sağlama, etkili iletişim kurma, ekip içinde çalışma, karşılaştıkları problemleri çözme ve mal veya hizmetin kalitesini artırmak için sorumluluk alma gibi becerilere sahip olmaları beklenmektedir [13].

Çağımızda okullardan, yalnızca öğrencilerin akademik başarılarını artırmaları değil; aynı zamanda onlara sosyal ve toplumsal değerler kazandırılmaları, kişisel gelişimlerine katkıda bulunmaları beklenmektedir. Bu süreç, ders içi ve ders dışı etkinliklerle öğretimi bütünlüklü bir şekilde yapılmalıdır. Öğretimin temel rehberi eğitim programları olması yanında müfredat dışı etkinlikler de zorunlu veya seçmeli derslerle benzer amaç ve işlevlere hizmet eder. Ancak bu etkinlikler, resmi programa dahil olmayan, farklı deneyimler ve yaşantılar sunar [37].

Eğitim kurumlarında çeşitli müfredat dışı etkinlikler sunulmaktadır. Bu müfredat dışı etkinlikler arasında spor, münazara, kompozisyon yazma, drama veya tiyatro, farklı kulüpler ve öğrenci konseyleri olabilmektedir [27]. Son zamanlarda, ülkemizdeki bazı üniversiteler bu konuya önem vererek öğrencilerin müfredat dışı etkinliklerini takip etmek amacıyla çeşitli sistemler geliştirmiştir. Bu sistemler genellikle Sosyal Transkript (Social Transcript) veya bazı üniversitelerde Akademik Olmayan Transkript (Non-Academic Transcript) olarak adlandırılmaktadır [1,5,8,16,31,41].

Bu araştırmanın problemi müfredat dışı etkinliklerin öğrencilerden derlenmesi, akademik danışmanlar tarafından kontrol edilmesi ve sosyal transkript belgesi haline dönüştürülmesi sürecini yönetebilecek bir bilgi sisteminin nasıl geliştirilmesi gerektiği sorusudur. Araştırmanın ana amaçları ise şu şekildedir:

Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sisteminin,

- Gereksinim analizinin yapılması
- Tasarımının yapılması
- Geliştirilmesi
- Uygulamaya alınması
- Kullanılabilirlik analizinin yapılması
- Analiz sonuçlarının raporlanması
- Sonuçlar ışığında bilgi sisteminde gerekli revizyonların yapılması ve Üniversite yönetiminin bilgilendirilmesidir.

Mevcut ulusal alanyazına bakıldığında müfredat dışı etkinliklere yönelik sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, alanyazındaki bu çalışmaların müfredat dışı etkinliklerle ilgili olmakla birlikte hiçbirinde müfredat dışı etkinliklere yönelik bir bilgi sisteminin geliştirilmesinin konu edinilmemiş olduğu görülmektedir [2,3,6,9,17,18,24,29,35,36,37,40].

Ulusal alanyazında bu konunun henüz ele alınmamış olması araştırmanın özgünlüğünü vurgulamaktadır. Meyliana vd. tarafından yapılan çalışmada müfredat içi ve dışı aktivitelerin bir bilgi sistemiyle kayıt altına alınmasının önemi vurgulanmıştır. Hatta güncel teknolojilerden olan blokzincir teknolojisinin üniversitelerde sınav, notlandırma ve değerlendirme süreçlerinde veri bütünlüğünü garanti ederek daha güvenli bir veri depolama sağladığını göstermişlerdir [43]. Bu bilgiler ışığında hem eğitim kurumları hem de iş dünyası açısından ileride önemi giderek artacak olan müfredat dışı etkinliklerin belgelendirilmesi ve sistematik takibi için geliştirilen bu bilgi sistemi uygulamasının önemli katkıları olacağı öngörülmektedir.

### 1.1. Araştırma yöntemi (Research method)

Bu çalışmada tasarım tabanlı araştırma yöntemi kullanılmıştır. Wang ve Hannafin tasarım tabanlı araştırmayı şu şekilde tanımlamıştır [38]: Döngüsel olarak gerçekleştirilen analiz, tasarım, geliştirme ve uygulama süreçlerinin, araştırmacı ve katılımcılar arasında iş birliği içinde ve gerçek uygulama ortamında yapıldığı; bağlama duyarlı tasarım ilkeleri ve kuramlarının geliştirilmesine yönelik, eğitim uygulamalarını iyileştirme amacını taşıyan sistematik ve esnek bir araştırma yöntemidir. Tasarım ve geliştirme araştırmaları birincisi öğretim materyali veya teknolojisinin doğrudan geliştirilmesi, ikincisi

de bu ürünlerin geliştirilme sürecinde benimsenen modellerin ortaya konulması olmak üzere iki ana amaç taşır [22].

Bu çalışma tasarım tabanlı araştırma adımlarına uygun olarak aşağıdaki şekilde yürütülmüştür:

- Analiz
  - ✓ Bu kapsamda yönerge, mevcut iyi uygulamalar ve Üniversite yönetiminin beklentileri incelenmiştir.
- Tasarım
  - ✓ Analiz sonucu ortaya konulan gereksinimler doğrultusunda sistemin donanımsal ve yazılımsal mimari tasarımı, iş akış diyagramları, kullanıcı rolleri tasarlanmıştır.
- Geliştirme
  - ✓ Bu aşamada analiz ve tasarım süreçlerine bağlı kalarak sistemin kodlama süreci gerçekleştirilmiştir.
- Uygulama
  - ✓ Kodlama sonrası sistem ön çalışabilirlik testlerinin tamamlanmasının ardından kullanıma açılmıştır. Bu aşamada kullanıcı eğitimleri ve sistemle ilgili bilgilendirme yapılmıştır.

Araştırma tasarım tabanlı araştırma süreçlerinin yinelenen bir döngüsü şeklinde uygulanmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu süreklilik arz eden döngü sayesinde devam eden bir iyileştirme faydası sağlanmaktadır. Yapılan tüm işlemlerle ilgili bulgular çalışmanın ilerleyen bölümlerinde raporlanmıştır.

## 1.2. Evren ve örneklem (Universe and sampling)

Nielsen yapmış olduğu çalışmada 1 ile 25 kullanıcı arasında bir grupta yapılan kullanılabilirlik analizinde aslında 5 kullanıcının toplam hataların %70 ve üstünde bir oranda eksikleri bulmaya yeterli geldiğini ve beşten fazla katılımcının araştırmaya katılmasıyla hata sayısının tespitinde ilerleme olduğu ancak bu grup kadar yüksek oranlarda ilerlenemediğini bildirmiştir [23]. Diğer taraftan Tullis ve Albert bir kullanılabilirlik testi için gerçekten hedef kullanıcıları temsil ettiklerinden emin olmak koşuluyla, biçimlendirici bir kullanılabilirlik çalışmasında, her bir iterasyon için yaklaşık altı ila sekiz katılımcıyla test yapılmasının genellikle yeterli olduğunu bildirmiştir [33]. Eğer farklı kullanıcı grupları varsa, her grubu temsil eden en az dört kişiden, özetleyici kullanılabilirlik çalışmaları için ise mümkünse 50 ila 100 temsili kullanıcıdan veri toplanması tavsiye edilmiştir.

Araştırmanın evrenini, bugüne kadar Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'ni kullanan 326 öğrenci ve 82 akademik danışman oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında sosyal transkript sisteminde kayıtlı 71 öğrenci ve 25 akademik danışman olmak üzere toplam 96 katılımcının görüşlerine başvurulmuştur. Araştırmaya katılım sağlayan öğrencilerin cinsiyet bazında dağılımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Öğrencilerin cinsiyet bazında dağılımları (Gender distribution of students)

Cinsiyet	Frekans	Yüzdeler
Kadın	55	%77,5
Erkek	16	%22,5
<b>Toplam</b>	<b>71</b>	<b>%100</b>

Araştırmaya katılım sağlayan öğrencilerin fakülte bazında dağılımları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Öğrencilerin fakülte bazında dağılımları (Faculty distribution of students)

Fakülte	Frekans	Yüzdeler
Gazi Eğitim Fakültesi	28	%39,4
Mühendislik Fakültesi	10	%14,1
Mimarlık Fakültesi	6	%8,5
Fen Fakültesi	10	%14,1

Sağlık Bilimleri Fakültesi	9	%12,7
Teknoloji Fakültesi	3	%4,2
Spor Bilimleri Fakültesi	3	%4,2
Uygulamalı Bilimler Fakültesi	2	%2,8
<b>Toplam</b>	<b>71</b>	<b>%100</b>

Katılımcılar arasında yer alan öğrencilerin okudukları sınıf seviyelerine göre dağılımları incelendiğinde 1. Sınıfta okuyan 5 kişi (%7), 2. Sınıfta 7(%9,9), 3. Sınıfta 20 kişi (%28,2) ve 4. Sınıfta 39 kişi (%54,9) bulunduğu görülmektedir. Bu anlamda katılımcıların büyük çoğunluğunun 3. ve 4. Sınıf öğrencilerinden oluşması Sosyal Transkript Sistemini daha uzun süre deneyimlemeye fırsat bulmuş olmaları bakımından veri çeşitliliğini zenginleştiren bir durum olarak değerlendirilmektedir.

### 1.3. Verilerin toplanması ve analiz (Data collecting and analysis)

Araştırmacı tarafından geliştirilen “Sosyal Transkript Sistemine Yönelik Görüş Ölçeği” etik kurul izni alınması sonrası verileri toplamak için araç olarak kullanılmıştır. Ölçek oluşturulurken alanyazındaki çalışmalar incelenmiş, öğrenciler ve akademik danışmanlar için örnek madde havuzu oluşturulmuştur. Ardından madde havuzu dikkate alınarak öğrenciler ve akademik danışmanlar için ortak veya birbirine paralel sorulardan oluşan Sosyal Transkript Sistemine Yönelik Görüş Ölçeği oluşturulmuştur. Geliştirilen 5’li likert tipteki ölçeğe yönelik ölçek geliştirme alanında deneyimli üç alan uzmanından uzman görüşü alınmıştır. Uzman görüşlerine göre maddelerin ifade şekilleri sadeleştirilmiştir. Oluşturulan ölçeklerin revize edilmiş son hali Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmektedir.

Tablo 3. Öğrenciler için görüş ölçeği soruları (Opinion scale questions for students)

No	Soru Açıklaması
S1	Üniversitemde okuyor olmaktan memnunum
S2	Üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetler yeterlidir
S3	Üniversite tarafından ücretsiz olarak sağlanan sosyal aktivitelerin sınırlı sayıda olması Sosyal Transkript uygulamasına aktif katılımı sınırlandırmaktadır
S4	Sosyal Transkript belgesine sahip olmamın iş hayatına atılmama kolaylaştıracağını düşünüyorum
S5	Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript uygulamasını işe girişte dikkate alması beni Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ni kullanmaya teşvik eder
S6	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ne dilediğim zamanda dilediğim yerden erişebilmekteyim
S7	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin kullanımı kolay değildir
S8	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin arayüzü kullanıcı dostudur
S9	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi ile ilgili düzenlenen yardım dokümanları ve yönergeler yeterince açıklayıcıdır
S10	Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde puanlama tablosuna dahil edilen aktivitelerin çeşitliliği yeterli değildir
S11	Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde aktiviteler için belirlenmiş olan puanların dağılımı adildir

Araştırma kapsamında akademik danışmanların görüşü alınırken öğrenciler için sorulması planlanan ancak akademik danışmanlar için uygun olmayan 1.soru dahil edilmemiş, öğrencilere özel olan 4. ve 5. sorular ise akademik danışmanlara göre özelleştirilerek uygulanmıştır. Tablo 4’te akademik danışmanlar için özelleştirilen ölçek soruları verilmiştir.

Tablo 4. Akademik danışmanlar için görüş ölçeği soruları (Opinion scale questions for academic advisors)

No	Soru Açıklaması
S1	Üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetler yeterlidir
S2	Üniversite tarafından ücretsiz olarak sağlanan sosyal aktivitelerin sınırlı sayıda olması Sosyal Transkript uygulamasına aktif katılımı sınırlandırmaktadır
S3	Sosyal Transkript belgesine sahip olmanın öğrencilerin iş hayatına atılmasını kolaylaştıracağını düşünüyorum
S4	Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript uygulamasını işe girişte dikkate alması Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ni kullanmaya teşvik eder
S5	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ne dilediğim zamanda dilediğim yerden erişebilmekteyim
S6	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin kullanımı kolay değildir
S7	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin arayüzü kullanıcı dostudur
S8	Sosyal Transkript Bilgi Sistemi ile ilgili düzenlenen yardım dokümanları ve yönergeler yeterince açıklayıcıdır
S9	Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde puanlama tablosuna dahil edilen aktivitelerin çeşitliliği yeterli değildir
S10	Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde aktiviteler için belirlenmiş olan puanların dağılımı adildir

Uzman görüşleri sonrası son hali verilen görüş ölçeği çevrimiçi ortamda (Google Forms) katılımcılarla paylaşarak verilerin toplanması sağlanmıştır. Görüş ölçeğinden elde edilen veriler IBM SPSS Statistics yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve betimsel istatistikler elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan bir diğer veri toplama aracı ise yarı yapılandırılmış görüşme sorularıdır. Çalışma kapsamında veri çeşitliliğini sağlamak adına yapılan görüşme davetine gönüllü katılım sağlayan 10 öğrenci ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada birden fazla veri kaynağının kullanılması veri çeşitliliğini arttırmaktadır (triangulation - iç geçerlilik). Nicel verilerin nitel verilerle desteklenmesi katılımcı görüşlerini daha detaylı tasvir etmeyi mümkün kıldığı (thick description- dış geçerlilik) için geçerliği arttırmaktadır [42].

## 2. Kavramsal Çerçeve (Conceptual Framework)

### 2.1. Müfredat dışı etkinlik kavramı (The concept of extracurricular activities)

Üniversiteler, akademik programlarını genellikle ulusal hedeflere uygun olarak tasarlarlar. Kalkınma çalışmaları, kaliteli eğitimin ekonomik kalkınmanın temel belirleyicilerinden biri olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, eğitimciler ve politika yapıcılar, üniversitelerin sunduğu programların kalitesini sürekli olarak artırmanın yollarını aramaktadır. Öğrencilerin kişisel deneyimlerini keşfetmelerini ve bu deneyimler üzerine öğrenmelerini desteklemek amacıyla müfredat dışı faaliyetler başlatılmıştır [26].

Bartkus vd. müfredat dışı etkinlikleri “*okulun himayesi altında yürütülen ancak normal sınıf zamanının dışında gerçekleşen ve müfredatın bir parçası olmayan akademik veya akademik olmayan etkinlikler*” olarak tanımlamıştır [7]. Müfredat dışı etkinlikler, beceri geliştirmenin yanı sıra sosyal ve davranışsal hedeflere odaklanan yapılandırılmış ve organize faaliyetlerdir [12]. Müfredat Dışı Etkinlik deneyimi, artık öğrencilerin okul hayatının önemli bir bileşeni haline gelmiştir ve günümüzde birçok öğrenci müfredat dışı etkinliklere katılmaktadır. Zira günümüzün dinamik iş dünyasında konular daha karmaşık hale geldikçe, yükseköğretim kurumlarından nitelikli insan gücü yetiştirmeleri talep edilmektedir [28].

Bu kazanımları sağlayan etkinlikler, öğrencilerin ders rutinleri haricinde spor takımlarına katılmak, kulüplerde görev almak, gönüllü çalışmalara iştirak etmek, müzik ya da sanat programları ve birçok diğer etkinliklere katılımı içerebilir. Bununla beraber müfredat dışı etkinlikler; okullardaki kulüpler, yarışmalar, atletizm, turnuvalar, tiyatro ya da drama etkinlikleri, öğrenci konseyleri, okul dergisi gibi yayınları, münazaralar, müzik ya da koro çalışmaları gibi birçok sosyal ve kültürel etkinliği içermekle beraber bunlarla sınırlı kalmayacak kadar geniş bir kapsama da sahiptir [37].

### 2.2. Müfredat dışı etkinliklerin kişisel gelişim ve başarıya olan katkısı (The contribution of extracurricular activities to personal development and success)

İş dünyası liderleri sosyal-duygusal öğrenmenin akademik beceriler geliştirmek kadar önemli olduğu konusunda hemfikirdir [25]. Müfredat dışı faaliyetler, sosyal ilişkiler kurmanın yanı sıra sadece akademik değil akademik olmayan sosyal-duygusal beceriler de sağlamaktadırlar [30]. Müfredat dışı faaliyetlerin öğrenciler üzerindeki etkileri, üretken ve başarılı yetişkinler olmanın yanı sıra öz saygıyı artırmak, ilişkiler kurmak ve hedefler üzerinde çalışmak için gereken etkilerdir [21]. Müfredat dışı etkinlikler aynı zamanda eğitim ortamlarında bulunan takım çalışması, inisiyatif ve sosyal sorumluluk gibi boşlukları da doldurabilir [19].

Akademik gelişim açısından bakıldığında, ders dışı etkinliklerin öğrencilerin akademik başarılarını artırdığı [10,11,15,20] ve analitik düşünme ve problem çözme becerilerine katkıda bulunduğu [21] görülmüştür. Kişisel gelişim alanında ders dışı etkinliklerin girişimcilik, liderlik becerileri, sorumluluk alma ve sorunlarla başa çıkma becerilerine katkı sağladığı söylenebilir [34].

İşverenler, ek beceriler geliştiren öğrencileri tercih etmektedir çünkü bu etkinlikler özgüveni artırır, iletişim becerilerini geliştirir ve liderlik gibi diğer özellikleri teşvik eder. Çoğu insan ders dışı

etkinliklere katılımın önemini fark etmektedir çünkü bu faaliyetler kişisel becerileri ve özgüveni artırarak sosyal ve kültürel gelişime yardımcı olmakta ve akademik başarıyı desteklemektedir [32].

### 2.3. Sosyal transkript uygulamaları (Social transcript applications)

Ülkemizde bazı üniversitelerde “sosyal etkinliklerin kayıt edilmesi ve mezun olurken akademik diplomalarına ek olarak ayrı resmi bir belge olarak verilmesin amacıyla NAT kısaltmasıyla Non-Academic Transkript [1], akademik eğitimlerinin yanı sıra sosyal, kültürel ve sportif faaliyetlerde daha etkin olmalarına ve bu faaliyetlere katılımlarını belgeleyerek, kazanımlarını ve özgeçmişlerini zenginleştirmelerine katkı sağlamak [5], sosyal faaliyetlere katılımları sonucu elde edilen kazanımların tanınması ve sistemsel olarak kayıt altına alınması amacıyla [8,41], sosyal olaylara duyarlı, topluma fayda üreten, sorumluluk sahibi ve ayrıca, Sosyal Becerisi (İletişim, ekip çalışması, eleştirel ve analitik düşünme, liderlik), Yerli ve Millî Değer Yargıları, Evrensel ve İnsani Değerleri, Entelektüel Birikimi, Estetik anlayışı gelişmiş bireylerin yetişmesine katkı sağlamak amacıyla [31], Toplumsal Farkındalık ve Liderlik Belgesi (TFLB) adı verilen sistem [16]” uygulamaları yapılmıştır.

Uygulamalardan görüldüğü üzere Sosyal Transkript sistemlerinin ortak amaçları, öğrencilerin sosyal becerilerini, liderlik yeteneklerini ve deneyimlerini göstermelerine olanak tanıyacak şekilde öğrencilik hayatı boyunca öğrencinin ödül mekanizması da kullanılarak motivasyon edinmesi, yapılan müfredat dışı aktivitelerin belgelendirilerek mezuniyet sonrası iş başvurularında avantaj sağlaması amaçlanır.

### 2.4. Müfredat dışı etkinliklerle ilgili ulusal alanyazında yapılmış çalışmalar (Studies on extracurricular activities in national literature)

Çalışmayla benzerliği olan diğer akademik araştırmaların varlığını tespit edebilmek adına yapılan ulusal alanyazın taramasında 03.09.2024 tarihinde “sosyal transkript”, “müfredat dışı etkinlikler” ve “program dışı etkinlikler” anahtar kelimeleriyle ilişkili çalışmalar DergiPark sisteminde aranmıştır. Arama sonucunda “sosyal transkript” kelimeleriyle ilişkili bir çalışmaya ulaşılamamış, “müfredat dışı etkinlikler” kelimeleriyle ilgili 6 adet ve “program dışı etkinlikler” kelimeleriyle ilgili 8 adet olmak üzere toplamda 12 makale türü (iki makale her iki aramada da ortak listelendiği için) çalışmaya ulaşılmış olup çalışmaların içeriklerinin aşağıdaki şekilde olduğu görülmüştür:

- Bakioğlu ve Yıldız tarafından yapılan çalışmada “Finlandiya’nın PISA başarısına etki eden faktörler bağlamında, Türkiye’nin bu sınavlarda yaşadığı başarısızlığın nasıl açıklanabileceği” araştırılmıştır [6].
- Yüksel tarafından yapılan çalışmada “eğitim faaliyetinin doğasının çok faktörlü bir yapıya sahip olduğu düşüncesinden hareketle, bir eğitim sisteminin performansını değerlendirmeye yönelik bir algoritma” önerilmiştir [40].
- Atmaca ve Çakır tarafından yapılan çalışmada “bir devlet üniversitesindeki son sınıf İngilizce öğretmen adaylarının Türk Millî Eğitim Bakanlığı tarafından oluşturulan genel öğretmen yeterlikleri ve İngilizce öğretmen yeterlikleri kapsamındaki yeterlik düzeylerini belirlemeyi” amaçlamıştır [3].
- Sönmez ve Pektaş tarafından yapılan çalışmanın amacı “müfredat dışı biyoteknoloji etkinliklerinin, ortaokul öğrencilerinin biyoteknoloji bilgilerine ve bilimin doğası görüşlerine etkisini” incelemektir [29].
- Karaaslan ve Şen tarafından yapılan çalışmada “katılımcı öğretim görevlilerinin öğretmenlikten öğrenme danışmanlığına geçiş sürecinde edindikleri kazanımları” araştırılmıştır [17].
- Bozpolat ve Yıldız tarafından yapılan çalışmada “Türkçe öğretmenliği 2. sınıf öğrencilerinin Eğitimde Program Dışı Etkinlikler (EPDE) dersine yönelik görüşlerin belirlenmesi” amaçlanmaktadır [9].
- Uysal ve Kısa tarafından yapılan çalışmada “ülkemizde ilk Covid-19 vakasının görüldüğü 11 Mart 2020 tarihinden itibaren Burdur ilinde yer alan ilkokulların web sayfalarını program dışı etkinlikler bağlamında incelenmesi” amaçlanmıştır [36].
- Kocayığıt ve İkinci tarafından yapılan çalışmada “ortaöğretim okullarında uygulanmakta olan program dışı etkinliklerin öğretmen görüşlerine göre değerlendirilmesi” amaçlanmıştır [18].
- Uysal tarafından yapılan çalışmada “öğretmen adaylarının katıldıkları ya da katılmak istedikleri program dışı etkinliklere yönelik görüşlerinin alınması” amaçlanmıştır [35].



- Atmaca tarafından yapılan çalışmada "eğitimde program geliştirme ilkelerinden yola çıkılarak, eğitimde resmi program, uygulamadaki program ve program dışı etkinlikler arasındaki ilişki" tanımlanmıştır [2].
- Uzun ve Bolat tarafından yapılan çalışmada "literatürdeki deneysel çalışmalara özel önem verilerek program dışı etkinliklerin öğrenci gelişimine etkisinin incelendiği 25 çalışmanın sonuçları" derlenmiştir [37].
- Orhan vd. tarafından yapılan çalışmada "öğrencilerin ekstra program etkinliklerinin sağladığı faydalar hakkındaki görüşlerinin neler olduğu" araştırılmıştır [24].

Ulusal alanyazın taramasında incelenen bu çalışmalar, genel olarak müfredat dışı etkinlikler ve bu etkinliklerin doğrudan veya dolaylı faydalarına odaklanmıştır. Ancak, bu süreçleri takip etmek için araştırma kapsamında geliştirilen bir bilgi sistemi konusuna odaklanan çalışma bulunmamaktadır.

### 3. Bilgi Sisteminin Geliştirilmesi (Developing The Information System)

Yazılım geliştirme süreci, resmi tanımıyla yazılım geliştirme yaşam döngüsü (Software Development Life Cycle – SDLC) olarak adlandırılmaktadır. Bu döngünün içeriğinde planlama, gereksinim belirleme (analiz), sistem tasarımı, kodlama, test, uygulamaya alma, işletim ve bakım şeklinde adımları olan süreçler sırasıyla izlenir [39]. Bu çalışmada SDLC süreçleri kapsamında gereksinimlerin ortaya konulması, sistem tasarımı, kodlama, uygulamaya alma, test ve iyileştirme gibi aşamalar gözetilerek geliştirilen Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'nin kullanılabilirlik analizine yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

#### 3.1. Planlama ve gereksinimlerin ortaya konulması (Planning and identifying requirements)

Sosyal Transkript Projesi'nin ortaya çıkmasındaki en büyük motivasyon, öğrencilerin müfredat derslerinde öğrenemeyecekleri yetenekleri, farklı aktiviteler aracılığıyla kazanmalarını sağlayacak bir sisteme olan ihtiyaçtır. Bu sistemin temel hedefi, "*Öğrencileri sosyal, kültürel, sanatsal, sportif ve teknolojik alanlardaki faaliyetlere teşvik etmek*" olarak belirlenmiştir. Bu hedef doğrultusunda, öğrencilerin öğrenim süresi boyunca üniversite birimleri veya kamu/özel kurumlar bünyesinde katıldıkları topluma yönelik faaliyetler ve kariyer gelişimlerine katkıda bulunan etkinliklerin tanınması ve kayıt altına alınması amaçlanmıştır. Projenin uygulanması sonucunda ise, "*ön lisans ve lisans öğrenimi süresince, milli ve evrensel değer yargılarına sahip, girişimcilik ve sürdürülebilirlik becerileri yüksek, entelektüel birikimi güçlü mezunlar yetiştirmek*" çıktısı hedeflenmektedir.

Gazi Üniversitesi yönetimi tarafından belirlenen bu hedef, amaç ve nihai çıktılar doğrultusunda;

- Üniversite özelinde bir "Sosyal Transkript Yönergesi" oluşturulması
- Sosyal Etkinlik tanımlarının netleştirilmesi
- Başvuru ve belgelendirme sürecinin kurgulanması
- Öğrenciler arası rekabeti oluşturma ve ders dışı aktivitelerin müfredat dersleri gibi derecelendirilebilmesi için bir puanlama sisteminin belirlenmesi
- Öğrencilerin müfredat dışı etkinliklerini bildirebilecekleri, bunların mevzuata uygunluğunun denetlenebileceği, öğrenim sürecinin sonucunda elde edilen etkinlik puanlarının bir "*Sosyal Transkript Belgesi*"ne dönüştürülebileceği ve kullanıcıların etkileşimlerinin takip edilebileceği bir bilgi sisteminin tasarlanması ve geliştirilmesi
- Projenin, projeye ait mevzuatın ve sürecin nasıl işletileceğinin anlatılması için tanıtma ve yaygınlaştırma faaliyeti yapılması hususunda gereksinimler ortaya konulmuştur.

Geliştirilecek sistem için öncelikle iyi örnek alınabilecek diğer uygulamalar araştırılmış ve daha önce yapılmış olan akademik çalışmalardan derlemeler yapılmıştır. Var olan benzer projelere örnek olarak;

- Abdullah Gül Üniversitesi, Non-Academic Transkript projesi [1]
- Bolu İzzet Baysal Üniversitesi, Sosyal Transkript projesi [5]
- Bitlis Eren Üniversitesi, Sosyal Transkript Yönergesi [8]
- Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Sosyal Transkript Yönergesi [41]
- Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sosyal Transkript Yönergesi [31]

- İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Toplumsal Farkındalık ve Liderlik Belgesi Yönergesi [16] incelenmiştir.

Elde edilen bilgiler ışığında; Gazi Üniversitesi tarafından görevlendirilen yönerge hazırlama ekibinin hazırladığı taslak yönerge Üniversite yönetimine sunulmuş olup, Üniversite Senatosunun 05.06.2023 tarih ve 2023/176 sayılı kararıyla “Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Yönergesi” yürürlüğe girmiştir [14].

Yönergenin 5 numaralı kapsam maddesi “Sosyal transkript, öğrencinin akademik faaliyetleri dışındaki faaliyetlerini kapsar, bu sosyal kültürel ve bilimsel faaliyetler:

- Girişimcilik eğitim faaliyetlerinin (firma kurulması, patent başvurusu yapılması, patent alınması, faydalı model)
- Öğrenci toplulukları tarafından yapılan faaliyetleri
- Sosyal sorumluluk faaliyetlerini
- Sürdürülebilirlik faaliyetlerini
- Bilim, kültür, sanat ve spor alanında yapılan etkinlikler ile bu alanlarda ulusal ve uluslararası düzeyde kazanılan ödüller ve dereceleri
- Gönüllülük kapsamında yapılan faaliyetleri
- Teknoparklarda yapılan staj faaliyetlerini
- TÜBİTAK kapsamında ve diğer kamu kurum ve kuruluşlarında yapılan projeleri kapsamaktadır” şeklinde belirlenmiştir [14].

Yönergenin hazırlandığı bu aşamaya kadar elde edilen bilgilere dayalı olarak sistemin işleyişi ve genel amaçları Ayaz vd. tarafından uluslararası bir konferansta sözlü bildiri olarak sunulmuştur [4].

Sistemin genel mimarisi ve kullanımıyla ilgili gereksinimler temel olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

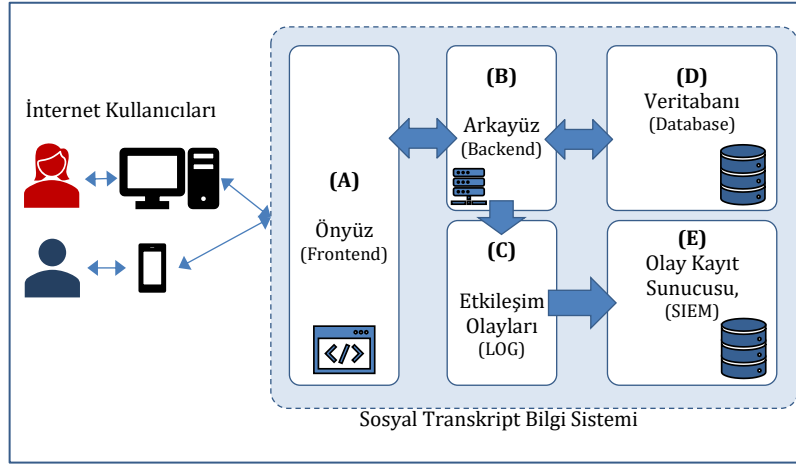
- Bilgi Sistemi için kullanılacak geliştirme ve uygulama ortamları/araçları açık kaynak kodlu olmalıdır ve lisans alımı gerektirmemelidir.
- Bilgi sistemi için alan adı ayrılmalıdır ve SSL güvenliği alınmalıdır.
- Bilgi sistemi taşınabilir olmalı, gerektiğinde kolayca yatay ve dikey olarak kapasitesi genişletilebilmelidir.
- Bilgi Sistemi web temelli olmalıdır. Kullanıcıların kullandıkları taşınabilir veya sabit tüm bilgisayar ve tarayıcılardan uyumlu bir şekilde kullanılabilmelidir.
- Sistemin kullanıcıları rol temelli yetkilendirme ile işlemlerini yapabilmelidir.
- Bilgiler öğrenci kullanıcılar tarafından sisteme girilmeli, akademik danışmanlar tarafından yönergeye uygunluğu kontrol edilerek onaylanmalı veya reddedilmelidir.
- Sistem üzerindeki tüm kullanıcı etkileşimleri kayıt (log) edilmelidir.
- Üretilen sosyal transkript belgeleri e-devlet üzerinden alınabilmelidir.

### 3.2. Sistem tasarımı (System design)

Sosyal Transkript Bilgi Sistemi web erişimi için kullanıcıların <https://sosyaltranskript.gazi.edu.tr> alan adı üzerinden çalıştırabileceği şekilde beş katmanlı modüler bir web uygulama yazılımı olarak tasarlanmıştır.

- A katmanı kullanıcıları karşılayan önyüz (frontend) katmanı
- B katmanı önyüz ile veritabanı arasındaki işleri yerine getiren servislerin olduğu ve kullanıcıların doğrudan erişemediği arkayüz (backend) katmanı,
- C katmanı arkayüz ile merkezi olay kayıt (log) sunucu arasındaki bilgi akışını sağlayan katman,
- D katmanı ise bilgi sisteminde oluşan her türlü verinin kayıt altına alındığı veritabanı (database) katmanı olarak tasarlanmıştır. Veritabanı olarak açık kaynak kodlu PostgreSQL veritabanı yönetim sistemi kullanılmıştır.
- E katmanı üniversitenin tüm bilgi sistemlerinin log olaylarının kaydedildiği merkezi log sunucusudur.

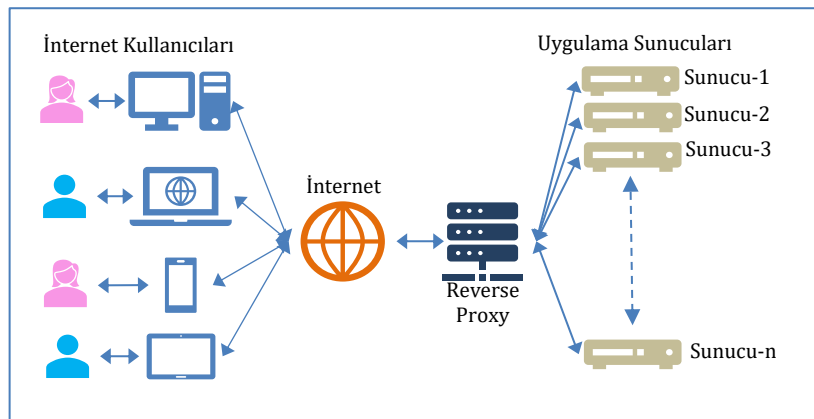
Katmanların etkileşimleri ve sistemin tasarımının araştırmacı tarafından oluşturulan şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan bilgi sistemi katmanları (Designed information system layers)

Uygulama sunucusu önyüz ve arkayüz bileşenleri (API-Application Programming Interface) için Gazi Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığı sanallaştırma platformu kaynaklarından ayrılan 16 çekirdek sanal CPU (vCPU) ve 32 GB RAM kapasitesine sahip Linux işletim sistemli sunucu kurulması, veritabanı sunucusu ise aynı sanallaştırma ortamında ayrılan 16 çekirdek vCPU ve 32 GB RAM ile çalışan Linux işletim sistemi kurulu sanal sunucuda çalışacak şekilde kaynak ayrılması planlanmıştır. Gereksinimlerde belirlendiği üzere sistem hiçbir lisans gereksinimi olmayacak, taşınabilir ve ölçeklenebilir şekilde tasarlanmış olup Ubuntu Linux işletim sistemi üzerine kurulu Docker sanallaştırma platformunda çalışacak şekilde tasarım yapılmıştır.

Docker sanallaştırma platformu üzerinde çalıştırılan sistemin derlenmiş kopyalarını içeren imajlar belirli portlar üzerinden çalışmaları için ön bağlantısında Nginx Reverse Proxy sistemi kurularak gerektiğinde taşıma ve ölçeklendirme gereksinimleri karşılanacak şekilde planlama yapılmıştır. Reverse Proxy sistemleri kurgulandıkları konfigürasyona bağlı olarak ön ve arka yüzleri arasında köprü görevi görerek arka yüze bağlı bir ya da birden fazla uygulama sunucusunu ön yüz aracılığıyla bağlanmaya çalışan kullanıcılara tek bir sunucu gibi hizmet sunabilmektedir. Tasarımda kullanımı tercih edilen reverse proxy'nin çalışma prensibi şematik gösterimi araştırmacı tarafından oluşturularak Şekil 2'de verilmiştir.

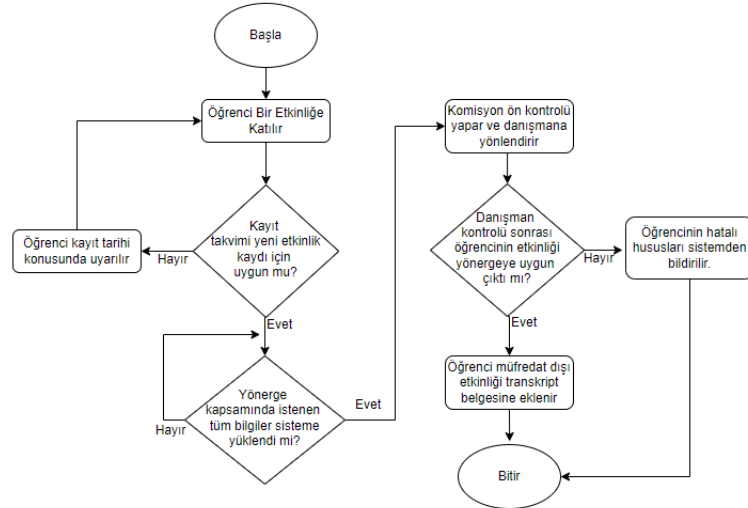


Şekil 2. Kurulan Nginx Reverse Proxy şematik gösterimi (Schematic illustration of Nginx Reverse Proxy)

### 3.3. Kodlama (Coding)

Bilgi sisteminin önyüzü (frontend) HTML5 standartlarında uygun olarak Typescript (Angular) ile kodlanmıştır. Kullanıcı arayüzleri için masaüstü, tablet ve akıllı telefonların ekran boyları ile uyumlu olan Responsive tasarıma sahip Material Pro isimli hazır HTML5 Template paketi kullanımı tercih edilmiştir. Arkayüz kısmı için ise .Net Core 6 Framework alt yapısı tercih edilerek kodlamalar

gerçekleştirilmiştir. Sistemin kodlama süreci öncesinde her bir sürece dair varlık-ilişki diyagramları (ER-Entity relationship diagrams) çizilerek iş akışları oluşmuştur. Öğrenci tarafından onaya teklif edilecek olan bir “Sosyal Etkinlik” kayıt işleminin bilgi sisteminde kurgulanan iş akışı Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Sosyal etkinlik kayıt işlemi iş akışı (Social activity registration process workflow)

### 3.4. Devreye alma (Application)

Geliştirilen uygulama ön test aşamalarıyla gözden geçirildikten sonra alan adı adresi (URL) olarak belirlenen <https://sosyaltranskript.gazi.edu.tr> adresi üzerinden kullanıma açılmıştır. Uygulamaya alma işleminden sonra sistemin tanıtımı amacıyla öğrenci ve akademik danışmanlara yönelik kullanıcı eğitimleri verilmiştir. Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi resmi kullanımı 6 Ekim 2024 tarihinde yapılan duyuru ile 2023-2024 Güz yarıyılı itibarıyla başlatılmıştır. Bu tarih ile araştırma için verilerin derleme tarihi olan 29 Temmuz 2024 tarihi arasında 326 öğrenci toplam 935 faaliyet bildirmiş olduğu bu faaliyetlerden 793 adetinin akademik danışmanlarca yapılan inceleme sonucu uygun bulunarak onaylanmış olduğu, 142 adetinin ise yönergeye uygun olmadığı için reddedildiği verileri geliştirilen bilgi sisteminden derlenmiştir.

## 4. Bulgular (Findings)

Araştırma kapsamında 71 öğrenci, 25 akademik danışman olmak üzere 96 katılımcıdan toplanan ölçek verileri ve 10 öğrenci ile gerçekleştirilen yarı yapılandırılmış görüşmelerden elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş olup, ulaşılan bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

### 4.1. Öğrenci katılımcıların bulguları (Findings of student participants)

Araştırmaya katılım sağlayan öğrencilerin beşli likert tipi sorulara vermiş oldukları cevapların frekans ve yüzdelikleri Tablo 5’te verilmiştir.

Ölçeğin likert tipi çoktan seçmeli sorularına verilen öğrenci cevaplarına göre;

- “Üniversitemde okuyor olmaktan memnunum” sorusuna cevap veren öğrencilerin 36’sı katılıyorum, 28’i ise kesinlikle katılıyorum diyerek toplamda 64 kişi %90,1 oranında memnuniyet belirtmiştir.
- “Üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetler yeterlidir” sorusuna cevap veren öğrencilerin 9’u kesinlikle katılmıyorum, 24’ü katılmıyorum ve 19’u kararsızım diyerek toplamda 52 kişi %73,3 oranında memnuniyetsizlik belirtmiştir. Bu durumda üniversitede okumaktan memnun olan öğrencilerin büyük bir kısmı sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif faaliyetleri yeterli bulmadığı yönünde fikir beyan etmişlerdir.

- “Üniversite tarafından ücretsiz olarak sağlanan sosyal aktivitelerin sınırlı sayıda olması Sosyal Transkript uygulamasına aktif katılımı sınırlandırmaktadır” sorusuna cevap veren öğrencilerin 36’sı katılıyorum, 15’i ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 51 kişi %71,8 oranında 2.soru cevapları ile örtüşecek şekilde müfredat dışı faaliyetlerin artırılması yönünde fikir beyan etmişlerdir.
- “Sosyal Transkript belgesine sahip olmamın iş hayatına atılmamı kolaylaştıracağını düşünüyorum” sorusuna cevap veren öğrencilerin 36’sı katılıyorum, 17’si ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 53 kişi %74,6 oranında öğrenci, uygulanan sistemi mezuniyet sonrası iş hayatlarını kolaylaştıracağını beyan etmiştir.

Tablo 5. Öğrenci cevaplarının frekans ve yüzdeleri (Frequency and percentages of student responses)

Soru No (*)	Kesinlikle Katılmıyorum (1 puan)	Katılmıyorum (2 puan)	Kararsızım (3 puan)	Katılıyorum (4 puan)	Kesinlikle Katılıyorum (5 puan)
s1	3 (%4,2)	2 (%2,8)	2 (%2,8)	36 (%50,7)	28 (%39,4)
s2	9 (%12,7)	24 (%33,8)	19 (%26,8)	15 (%21,1)	4 (%5,6)
s3**	2 (%2,8)	9 (%12,7)	9 (%12,7)	36 (%50,7)	15 (%21,1)
s4	5 (%7,0)	-	13 (%18,3)	36 (%50,7)	17 (%23,9)
s5	3 (%4,2)	1 (%1,4)	3 (%4,2)	28 (%39,4)	36 (%50,7)
s6	5 (%7,0)	8 (%11,3)	9 (%12,7)	29 (%40,8)	20 (%28,2)
s7**	10 (%14,1)	36 (%50,7)	12 (%16,9)	9 (%12,7)	4 (%5,6)
s8	6 (%8,5)	12 (%16,9)	12 (%16,9)	38 (%53,5)	3 (%4,2)
s9	6 (%8,5)	4 (%5,6)	11 (%15,5)	40 (%56,3)	10 (%14,1)
s10**	4 (%5,6)	17 (%23,9)	25 (%35,2)	19 (%26,8)	6 (%8,5)
s11	5 (%7,0)	9 (%12,7)	25 (%35,2)	28 (%39,4)	4 (%5,6)

(\*) Tabloda kullanılan kısaltmaların soru metinleri daha önce Tablo 3’te sunulmuştur.

(\*\*) İşaretili maddeler negatif madde köküne sahiptir.

- “Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript uygulamasını işe girişte dikkate alması beni Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ni kullanmaya teşvik eder” sorusuna cevap veren öğrencilerin 28’i katılıyorum, 36’sı ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 64 kişi %90,1 oranında kurgulanan sistemin kullanımı için teşvik motivasyonu içerdiğini belirtmiştir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ne dilediğim zamanda dilediğim yerden erişebilmekteyim” sorusuna cevap veren öğrencilerin 29’u katılıyorum, 20’si ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 49 öğrenci %69 oranında erişimin kolay olduğunu belirtmiştir. Bu durumda kalan %31 oranında öğrencinin neden erişim sorunu yaşadıkları üzerinde inceleme yapılarak erişim problemlerinin tespiti ve çözüm önerilerinin geliştirilmesi gereklidir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin kullanımı kolay değildir” sorusuna cevap veren öğrencilerin 10’u kesinlikle katılmıyorum, 36’sı katılmıyorum, 12’si ise kararsızım cevabı vererek toplamda 58 kişi %81,7 oranında sistemi kolayca kullanabildiği yönünde fikir beyan etmiştir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin arayüzü kullanıcı dostudur” sorusuna cevap veren öğrencilerin 38’i katılıyorum, 3’ü ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 41 öğrenci %57,7 oranında öğrenci arayüzü kullanışlı bulmakla beraber %42,3’lük dilime gelen öğrenciler katılmıyorum ve kararsızım cevapları vermiş olduğu için arayüzün kullanıcı dostu hale getirilmesi yönünde fikir beyan etmişlerdir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi ile ilgili düzenlenen yardım dokümanları ve yönergeler yeterince açıklayıcıdır” sorusuna cevap veren öğrencilerin 40’i katılıyorum, 10’u ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 50 kişi %70,4 oranında açıklayıcı ve yardımcı belgelerin, yönergelerin yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde puanlama tablosuna dahil edilen aktivitelerin çeşitliliği yeterli değildir” olumsuz sorusuna cevap veren öğrencilerin 4’ü kesinlikle katılmıyorum, 17’si katılıyorum, 25’si ise kararsızım diyerek toplamda 46 kişi %64,7 oranında tersi cevap vermiş



olup, tabloya dahil edilen aktivite çeşitliliğinin yeterli olduğunu beyan etmiştir. Ancak öğrencilerin 1/3 kısmından biraz fazla olan bir grup ise yeterli bulmadığı için yönergede belirtilen aktivitelerin zenginleştirilmesi yönünde fikir beyan etmişlerdir.

- “Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde aktiviteler için belirlenmiş olan puanların dağılımı adildir” sorusuna cevap veren öğrencilerin 5’i kesinlikle katılmıyorum, 9’u katılıyorum, 25’i ise kararsızım cevabı vererek toplamda 39 kişi %54,9 oranında puanlama tablosunun doğru yapılandırılmadığı yönünde fikir beyan etmiştir. Bu durumda öğrencilerin yarısının beyanına göre puanlama tablosunun yeniden ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Öğrenci değerlendirmeleri, üniversiteye yönelik genel memnuniyetin yüksek olduğunu, ancak sosyal, kültürel ve sportif olanakların yetersizliğinin bu memnuniyeti gölgelediğini göstermektedir. Sosyal Transkript uygulaması, iş hayatına hazırlık açısından değerli görülmekte ve kullanım motivasyonu yüksek olmasına rağmen, yazılımsal düzeyde arayüz tasarımı ve erişim sorunları sistemin etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, puanlama tablosunun adaletine yönelik algılar, değerlendirme süreçlerinin yeniden ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Bu bulgular, üniversitenin sosyal olanakları artırarak ve sistem işleyişine dair eksiklikleri gidererek öğrenci deneyimini iyileştirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5’te listelenen bulguların dışında öğrencilerin açık uçlu sorulara verdikleri cevapları için içerik analizi yapılmış olup bulgular Tablo 6’da sunulmuştur (katılımcılar Ö1, Ö2 ... ÖN şeklinde kodlanmıştır).

Tablo 6. Öğrenci katılımcıların açık uçlu sorulara cevaplarının kod-kategori bulguları tablosu (Table of code-category findings of student participants’ answers to open-ended questions)

Soru No	Soru Metni	Kod-Kategori	Cevaplayan Öğrenci (Kodları)
S1	Üniversitemizin sunduğu sosyal, kültürel ve sportif faaliyetleri hakkında ne düşünüyorsunuz?	Yetersiz Organizasyon	Ö1, Ö5
		Yeterli Organizasyon	Ö2, Ö6, Ö12, Ö13, Ö17
		Duyuruların Yetersizliği/ Yetersiz Farkındalık	Ö3, Ö10, Ö14, Ö16
		Teşviklerin Eşit/Yeterli Olmaması	Ö3, Ö10
		Etkinliklerin Ulaşılabilirliğinin Arttırılması	Ö4, Ö5
S2	Öğrenim hayatınız boyunca Sosyal Transkript Bilgi Sistemine konu olan faaliyetlerin kaç tanesine katılmayı planlıyorsunuz? Öğrenim hayatınız boyunca en çok gerçekleştirmek istediğiniz 3 faaliyet türünü belirtiniz.	Kurum Dışı Sosyal Etkinlikler	Ö1
		Bilimsel Çalışmalar	Ö1, Ö7, Ö14, Ö16
		Topluluk Faaliyetleri	Ö2, Ö3
S3	Varsa, Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ni kullanırken karşılaştığımız problem durumları nelerdir?	Tarayıcı Problemleri	Ö1, Ö4
		Arayüzün Kullanıcı Dostu Olmaması	Ö3, Ö15, Ö16
		Dosya Yükleme Hataları	Ö6, Ö9, Ö10, Ö13, Ö16
		Yeniden Başvuru Sürecinde Sistem Kısıtları	Ö4
		Faaliyet Tanımlamalarının Genişletilmesi	Ö3, Ö6, Ö17
		Yönergelerin Yetersizliği/Bulunmaması [Aslında yönerge var]	Ö3, Ö5, Ö9
S4	Sosyal Transkript uygulamasında geliştirilmesi gerektiğini düşündüğünüz özellikler nelerdir?	Puanlama Sisteminin Revize Edilmesi	Ö1, Ö5, Ö7
		Geçmiş Dönük Faaliyet Ekleme	Ö2, Ö4
		Veri Giriş Takviminin Revizyonu	Ö2, Ö4
		Kanıt Dosyalarının Sunulması	Ö2, Ö4, Ö5, Ö7
		Sosyal Transkript Sisteminin Öğrenci Otomasyon Sistemine Entegrasyonu	Ö3, Ö10
		Faaliyet Bazında Tavan Puanların Arttırılması	Ö4
		STS’de Derece Yapan Öğrencilerin Ödüllendirilmesi	Ö7
		Transkript Çıktısının Tasarımı Değişmeli	Ö7, Ö14

Yarı yapılandırılmış görüşmelerden elde edilen bulgular görüş ölçeğinden elde edilen bulgularla örtüşmektedir. Her iki veri kaynağında da öğrenciler, üniversitenin sosyal, kültürel ve sportif faaliyetlerinin yetersiz olduğunu ve bu alandaki hizmetlerin artırılması gerektiğini ifade etmektedirler. Ayrıca, Sosyal Transkript sisteminin iş hayatına katkı sağlayacağına dair öğrencilerde güçlü bir inanç bulunmakta, her iki kaynaktan da öğrenciler bu sistemin faydalı olduğunu ve kariyerlerine yardımcı olacağına inandıklarını belirtmektedirler. Teknik ve yazılımsal sorunlar konusunda ise, erişim ve arayüzdeki eksikliklerden şikâyet eden öğrenciler, sistemin daha kullanıcı dostu ve erişilebilir hale getirilmesini istemektedirler. Bunun yanı sıra, Sosyal Transkript Sisteminde yer alan puanlama

sisteminin adaletine dair eleştiriler de her iki veri kaynağında yer almakta ve sistemin yeniden yapılandırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Genel olarak, öğrenciler Sosyal Transkript sisteminden memnuniyet duysalar da, bazı alanlarda iyileştirme talepleri benzer şekilde ortaya çıkmaktadır.

#### 4.2. Akademik danışman katılımcıların bulguları (Findings of academic advisor participants)

Araştırma kapsamında toplamda 25 akademik danışman katılım sağlamıştır. Bu katılımdan elde edilen bulgular aşağıda sunulmaktadır. Araştırmaya katılım sağlayan akademik danışmanların likert tipi çoktan seçmeli sorulara vermiş oldukları cevaplara ait frekans ve yüzdelik değerler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Akademik danışman cevaplarının frekans ve yüzdelikleri (Frequency and percentages of academic advisor responses)

Soru No (*)	Kesinlikle Katılmıyorum (1 puan)	Katılmıyorum (2 puan)	Kararsızım (3 puan)	Katılıyorum (4 puan)	Kesinlikle Katılıyorum (5 puan)
s1	-	2 (%8,7)	9 (%39,1)	8 (%34,8)	4 (%17,4)
s2**	-	3 (%13,0)	9 (%39,1)	8 (%34,8)	3 (%13,0)
s3	-	3 (%13,0)	2 (%8,7)	12 (%52,2)	6 (%26,1)
s4	-	1 (%4,3)	6 (%26,1)	4 (%17,4)	12 (%52,2)
s5	-	1 (%4,3)	2 (%8,7)	7 (%30,4)	13 (%56,5)
s6**	5 (%21,7)	13 (%56,5)	2 (%8,7)	3 (%13,0)	-
s7	-	2 (%8,7)	3 (%13,0)	9 (%39,1)	9 (%39,1)
s8	2 (%8,7)	1 (%4,3)	3 (%13,0)	11 (%47,8)	6 (%26,1)
s9**	4 (%17,4)	6 (%26,1)	10 (%43,5)	2 (%8,7)	1 (%4,3)
s10	1 (%4,3)	-	5 (%21,7)	14 (%60,9)	3 (%13,0)

(\*) Tabloda kullanılan kısaltmaların soru metinleri daha önce Tablo 4’te sunulmuştur.

(\*\*) İşaretli maddelerden negatif madde köküne sahiptir.

Ölçeğin likert tipi sorularına akademik danışmanların vermiş olduğu cevaplara göre;

- “Üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetler yeterlidir” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 8’i katılıyorum, 4’ü kesinlikle katılıyorum diyerek toplamda 12 kişi %52,2 oranında memnuniyet belirtmiştir. Ancak bu durumda akademik danışmanların neredeyse diğer yarısı sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif faaliyetleri yeterli bulmadığı yönünde fikir beyan etmişlerdir.
- “Üniversite tarafından ücretsiz olarak sağlanan sosyal aktivitelerin sınırlı sayıda olması Sosyal Transkript uygulamasına aktif katılımı sınırlandırmaktadır” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 8’i katılıyorum, 3’ü ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 11 kişi %47,8 oranında katılımı sınırlandırdığını düşünmekle birlikte %52,2 oranındaki diğer grup müfredat dışı faaliyetlerin sınırlı olmasının uygulamaya katılımı sınırlandırmadığı yönünde fikir beyan etmişlerdir.
- “Sosyal Transkript belgesine sahip olmanın öğrencilerin iş hayatına atılmasını kolaylaştıracağını düşünüyorum” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 12’si katılıyorum, 6’sı ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 18 kişi %78,3 oranında akademisyen alınacak belgenin mezuniyet sonrası öğrencilerin iş hayatlarını kolaylaştıracağı yönünde fikir beyan etmiştir.
- “Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript uygulamasını işe girişte dikkate alması Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ni kullanmaya teşvik eder” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 4’ü katılıyorum, 12’si ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 16 kişi %70,6 oranında kurgulanan sistemin kullanımı için teşvik motivasyonu içerdiğini belirtmiştir.

- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’ne dilediğim zamanda dilediğim yerden erişebilmekteyim” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 7’si katılıyorum, 13’ü ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 20 akademik danışmanların %87,1 oranında erişimin kolay olduğunu belirtmiştir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin kullanımı kolay değildir” olumsuz sorusuna cevap veren akademik danışmanların 5’i kesinlikle katılmıyorum, 13’ü katılmıyorum, 2’si ise kararsızım cevabı vererek toplamda %86,9 oranında sistemi kolayca kullanabildiği yönünde fikir beyan etmiştir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi’nin arayüzü kullanıcı dostudur” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 9’u katılıyorum, 9’u ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 18 akademik danışmanların %78,2 oranında arayüzü kullanışlı bulmaktadır.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sistemi ile ilgili düzenlenen yardım dokümanları ve yönergeler yeterince açıklayıcıdır” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 11’i katılıyorum, 6’sı ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 17 kişi %73,9 oranında açıklayıcı ve yardımcı belgelerin, yönergelerin yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde puanlama tablosuna dahil edilen aktivitelerin çeşitliliği yeterli değildir” olumsuz sorusuna cevap veren akademik danışmanların 4’ü kesinlikle katılmıyorum, 6’sı katılıyorum, 10’u ise kararsızım diyerek toplamda 20 kişi %87 oranında tersi cevap vermiş olup, tabloya dahil edilen aktivite çeşitliliğinin yeterli olduğunu beyan etmiştir.
- “Sosyal Transkript Bilgi Sisteminde aktiviteler için belirlenmiş olan puanların dağılımı adildir” sorusuna cevap veren akademik danışmanların 14’ü katılıyorum, 3’ü ise kesinlikle katılıyorum cevabı vererek toplamda 17 kişi %73,9 oranında puanlama tablosunun doğru yapılandırılmış olduğu yönünde fikir beyan etmiştir. Bu durumda elde edilen sonuçlara göre puanlama tablosu öğrencilere göre adil değilken akademik danışmanlara göre adil bulunmuştur.

Öğrenci ve akademik danışman görüşleri, Sosyal Transkript sisteminin faydalarını desteklemekle birlikte iyileştirilmesi gereken alanlara işaret etmektedir. Öğrenciler üniversiteden genel olarak memnun olsalar da sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif faaliyetlerin yetersizliğini vurgulamış, Sosyal Transkript Sisteminde yer alan puanlama sisteminin adil olmadığını belirtmiş ve arayüz tasarımının geliştirilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Akademik danışmanlar ise sistemin erişim, kullanım kolaylığı ve faaliyet çeşitliliği açısından daha olumlu görüşler bildirirken, sosyal aktivitelerin artırılmasının uygulamaya katılımı teşvik edebileceğini ifade etmişlerdir. Her iki grup da Sosyal Transkript belgesinin mezuniyet sonrası iş hayatına olumlu katkılar sağlayacağını ifade etmişlerdir.

## 5. Sonuç ve Öneriler (Conclusion And Recommendations)

### 5.1. Sonuç (Conclusion)

Sosyal Transkript Bilgi Sistemi ve üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal, sportif faaliyetler ile ilgili öğrenci geri bildirimlerinden şu önemli çıkarımlar yapılabilir:

Müfredat dışı etkinlikler, bireylerin kişisel gelişiminde girişimcilik, liderlik, sorumluluk alma ve sorunlarla başa çıkma becerilerinin gelişimine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu etkinliklerin, bireylerin zaman yönetimi becerileri üzerinde de olumlu etkiler yarattığı belirtilmiştir. Ayrıca, kendini tanıma ve bireysel yeteneklerin keşfedilmesine olanak tanıdığı gibi, mesleki bilgi birikiminin artmasına da destek sunduğu ifade edilmektedir. Sosyal gelişim bağlamında, ders dışı etkinliklerin iletişim ve sosyalleşme becerilerini güçlendirdiği görülmektedir. Bu etkinlikler, bireylerin sosyal çevreleriyle daha etkin ve verimli bir iletişim kurmalarına olanak tanımaktadır. Duygusal gelişim açısından ise, ders dışı etkinliklerin eğlenme, mutluluk, iyi hissetme ve motivasyon artışı gibi olumlu duygusal nitelikleri desteklediği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, ders dışı etkinlikler bireyin çok yönlü gelişimine katkı sağlayan önemli bir araç olarak değerlendirilebilir [34]. Araştırma sonucunda hem öğrenciler hem de akademik danışmanlar müfredat dışındaki etkinliklerin olumlu yönlerine vurgu yapmışlardır. Her iki grup da müfredat dışındaki uygulamalara katılım sonucunda elde edilen kazanımların öğrencinin mezuniyet sonrası iş hayatına atılma sürecini kolaylaştıracağını düşünmektedir.

Program dışı etkinliklere (PDE) katılımın; akademik başarı, benlik saygısı, sosyal beceriler, yaşam

kalitesi ve ruh sağlığı gibi birçok alanda olumlu etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Ancak aşırı zaman ayrılması durumunda akademik başarı üzerinde olumsuz etkiler görülebilmektedir. PDE'lerin öğrenci özelliklerine uygun şekilde planlanması, bu etkinliklerden maksimum fayda sağlanması için kritik önemdedir. Literatürde, sosyoekonomik durumun PDE'ye katılımı etkilediği ve fırsat eşitsizliğine yol açtığı belirtilmiştir. Özellikle ABD'deki okullarda PDE'lerin eğitim kültürünün bir parçası olarak ele alındığı ve etkin bir şekilde uygulandığı gözlemlenmiştir [37]. Araştırma kapsamında Gazi Üniversitesi öğrencilerinin etkin bir şekilde katılım müfredat dışı etkinliklere daha fazla katılmak istedikleri ancak kısıtlamalar olduğunu ifade etmiştir. Belirtilen bu araştırmada sosyoekonomik koşullara bağlı kalınmak şartıyla etkinliklerin çeşitleri açısından farklar olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde başkent Ankara'da farklı yerlerde yerleşkeleri olan Gazi Üniversitesi akademik birimlerinde de eşit olmayan sosyal etkinliklerin düzenlenmesi durumu meydana gelmiş görünmektedir.

**Genel Memnuniyet:** Öğrencilerin büyük bir çoğunluğu (%90,1) üniversitelerinde okumaktan memnun olduklarını belirtmiştir. Ancak, bu memnuniyet sosyal faaliyetlerin eksikliklerine rağmen oluşmuş gibi görünmektedir.

**Sosyal ve Kültürel Hizmetlerin Yetersizliği:** Üniversitenin sunduğu sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetlerin yeterliliği konusunda öğrencilerin %73,3'ü memnuniyetsizlik belirtmiştir. Bu, üniversitenin sosyal faaliyetlerini artırması gerektiği konusunda önemli bir göstergedir.

**Sosyal Aktivitelere Katılımın Kısıtlanması:** Ücretsiz sosyal aktivitelerin sınırlı olması nedeniyle öğrenciler Sosyal Transkript uygulamasına aktif olarak katılmadıklarını belirtmiştir (%71,8). Sosyal faaliyetlerin artırılması, öğrencilerin bu sisteme katılımını da artırabilir.

**İş Hayatına Etkisi:** Sosyal Transkript belgesinin iş hayatına atılmayı kolaylaştıracağına inanan öğrencilerin oranı %74,6'dır. Bu, sistemin öğrencilerin kariyerleri için değerli görüldüğünü göstermektedir.

**Sektör Temsilcileri ve Teşvik:** Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript'i işe alım süreçlerinde dikkate almasının öğrencileri bu sistemi kullanmaya teşvik edeceği belirtilmiştir (%90,1). Bu, sektörel farkındalık ve iş birliklerinin önemini vurgular, bu elde edilen sonuç üniversitemiz açısından önemlidir ve devamlılığı için itina gösterilmesi gereklidir.

**Erişim ve Kullanılabilirlik:** Öğrencilerin %69'u Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'ne diledikleri zaman erişebildiklerini belirtirken, %31'lik bir kesim erişim problemleri yaşamaktadır. Bu sorunların çözümü için erişim kolaylığı artırılmalıdır.

**Kullanım Kolaylığı ve Arayüz:** Öğrencilerin %81,7'si sistemi kullanmanın kolay olduğunu belirtirken, %57,7'si arayüzün kullanıcı dostu olduğunu ifade etmiştir. Ancak, %42,3 oranında öğrencinin arayüz konusunda olumsuz görüş bildirmesi, arayüzün geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

**Yardım Belgeleri ve Yönergeler:** Öğrencilerin %70,4'ü yardım belgelerinin yeterli olduğunu düşünmektedir. Bu, bilgilendirme dokümanlarının öğrencilere yardımcı olduğunu gösterir.

**Aktivite Çeşitliliği ve Puanlama Sistemi:** Aktivitelerin çeşitliliği konusunda öğrencilerin %64,7'si mevcut durumu yeterli bulurken, %35,3'lük bir kesim aktivitelerin zenginleştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Puanlama sisteminin adil olmadığını düşünenlerin oranı %54,9'dur. Bu, puanlama sisteminin gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak, öğrenciler Sosyal Transkript Sistemi'nin iş hayatına katkısına dair olumlu düşüncelere sahip olsalar da, özellikle sosyal aktivitelerin artırılması, arayüzün kullanıcı dostu hale getirilmesi ve puanlama sisteminin adilliği gibi konularda iyileştirmeler beklemektedirler.

Açık uçlu sorulara verilen cevaplarda öğrenci görüşleri incelendiğinde sosyal etkinliklerin düzenlenmesi, duyurulması ve katılımın artırılması konusunda çeşitli noktalarını ele aldığı görülmüştür. Bu görüşlerden bazı temalar ve öne çıkan noktalar şu şekildedir:

**Üniversitenin Sosyal Faaliyetlerde Yetersizliği:** Öğrenciler, üniversitenin etkinlik düzenlemekte yetersiz kaldığını ve diğer okullarla karşılaştırıldığında eksik olduklarını düşünüyorlar (Ö1, Ö5, Ö13). Bazı öğrenciler özellikle kendi bölümleriyle ilgili yeterli proje ve etkinlik görmediklerini ifade ediyorlar (Ö5).

**Etkinliklerin Duyurulması ve Katılım Sorunları:** Etkinliklerin daha geniş kitlelere duyurulması gerektiği, afişleme ve duyuru yöntemlerinin yetersiz olduğu ve bu sebeple birçok etkinliğin farkına varılmadığı belirtiliyor (Ö3, Ö6, Ö10). Katılımın düşük olmasının bir nedeni olarak da etkinliklerin yeterince tanıtılmaması gösteriliyor (Ö17).

**Kampüsler Arasında Eşitsizlik:** Merkez kampüste yapılan etkinliklerin diğer fakültelere göre daha fazla olduğu, özellikle sağlık fakültesi gibi dış kampüslerde bu faaliyetlerin sınırlı olduğu ifade ediliyor (Ö4, Ö5).

**Sosyal Transkript Sistemi Üzerine Görüşler:** Sosyal transkriptin arayüzü ve kullanım zorlukları üzerine öğrencilerin şikayetleri var (Ö3, Ö4, Ö15). Özellikle dosya yüklemeye sorunlar yaşandığı ve arayüzün daha kullanıcı dostu hale getirilmesi gerektiği belirtiliyor. Bunun yanında, etkinliklerin nasıl kategorize edileceği konusunda da bazı eksiklikler olduğu vurgulanıyor (Ö6, Ö17).

**Belgelemeyle İlgili Zorluklar:** Birçok öğrenci, katıldıkları etkinlikleri belgeleme konusunda sıkıntılar yaşadıklarını dile getiriyorlar. Özellikle resmi belgelerin her zaman sunulmaması, bazı etkinliklerin yeterince belgelenememesi sorun yaratıyor (Ö2, Ö4, Ö5, Ö7). Bu da sosyal transkriptte yer alacak faaliyetlerin sınırlı kalmasına neden oluyor.

**Puanlama Sistemiyle İlgili Şikayetler:** Sosyal transkriptte yer alan puanlama sisteminin adil olmadığı, bazı etkinliklerin ya da görevlerin düşük puanlandırıldığı belirtiliyor. Özellikle bilimsel içeriklerin daha fazla puan alması gerektiği ifade ediliyor (Ö1, Ö7, Ö5).

Bu noktalar, üniversitelerin sosyal faaliyetler ve öğrenci toplulukları ile ilgili süreçlerini gözden geçirmesi gerektiğini ve öğrencilerin katılımını artıracak şekilde düzenlemeler yapmasının önemini vurguluyor. Özellikle etkinliklerin duyurulma yöntemlerinin geliştirilmesi, farklı kampüslerde de eşit şekilde etkinlik düzenlenmesi ve sosyal transkript sisteminin daha kullanıcı dostu hale getirilmesi gibi öneriler öne çıkıyor.

Diğer taraftan akademik danışmanların araştırmaya verdiği cevaplara dayalı olarak Sosyal Transkript Sistemi'ne yönelik genel memnuniyetini ve görüşlerini analiz edildiğinde bazı önemli çıkarımlar şu şekildedir:

**Sosyal, kültürel, sanatsal ve sportif hizmetler:** Akademik danışmanların %52,2'si üniversitenin sunduğu hizmetlerin yeterli olduğunu düşünürken, neredeyse diğer yarısı bu hizmetlerin yetersiz olduğunu belirtmiştir. Bu, üniversitenin bu alanda hizmetlerini geliştirmesi gerektiğine işaret ediyor.

**Sosyal aktiviteler ve katılım:** Akademik danışmanların %47,8'i sosyal aktivitelerin sınırlı olmasının Sosyal Transkript'e aktif katılımı sınırladığını belirtmiştir. Bu durum, sosyal aktivitelerin artırılması gerektiğini vurguluyor.

**Sosyal Transkript'in iş hayatına katkısı:** Akademik danışmanların büyük bir çoğunluğu (%78,3), Sosyal Transkript belgesinin öğrencilerin iş hayatına atılmalarını kolaylaştıracağını düşünüyor. Bu, sistemin öğrencilerin kariyer gelişimine yönelik olumlu bir katkı sağladığı algısını gösteriyor.

**Sektör temsilcilerinin dikkati ve teşvik:** %70,6 oranında akademik danışmanlar, sektör temsilcilerinin bu uygulamayı işe girişte dikkate almasının, sistemi kullanmaya teşvik edici olacağını belirtmiştir. Bu, iş dünyasıyla olan bağlantıların güçlendirilmesi gerektiğine dair bir sinyal olabilir.

**Erişim kolaylığı:** Akademik danışmanların %87,1'i Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'ne kolayca erişebildiklerini belirtmiştir, bu da sistemin erişim açısından kullanıcı dostu olduğunu gösteriyor.



**Kullanım kolaylığı:** Sistem kullanımının kolay olduğuna dair yüksek bir oran (%86,9) mevcuttur. Bu durum, teknik olarak sistemin iyi yapılandırıldığını ve kullanıcı dostu olduğunu destekler niteliktedir.

**Arayüz:** %78,2 oranında akademik danışmanlar arayüzü kullanıcı dostu bulmuştur. Bu da sistemin tasarım ve kullanılabilirlik açısından olumlu karşılandığını gösterir.

**Yardım dokümanları:** %73,9 oranında akademik danışmanlar yardım dokümanlarını yeterince açıklayıcı bulmaktadır. Ancak yine de %26,1'lik bir kısım, bu alanda iyileştirme yapılması gerektiğini düşündüğünü belirtiyor.

**Aktivite çeşitliliği:** %87 oranında akademik danışmanlar aktivite çeşitliliğini yeterli bulmuş olup, bu sistemdeki faaliyetlerin geniş bir yelpazede sunulduğu anlamına geliyor.

**Puanlama tablosunun adilliği:** %73,9 oranında akademik danışmanlar puanlamanın adil olduğunu belirtmiş olsa da, bu puanlama sistemi öğrenciler tarafından aynı derecede adil bulunmamış olabilir. Bu durum, öğrenci ve akademik danışmanlar arasında farklı beklentiler ve değerlendirmeler olduğunu gösteriyor.

Genel olarak, akademik danışmanların büyük bir kısmı Sosyal Transkript Sistemi'nin işlevselliği, erişilebilirliği ve kullanılabilirliğinden memnun görünüyor. Bununla birlikte, sosyal aktivitelerin artırılması, yardım belgelerinin geliştirilmesi ve öğrencilerin puanlama sistemine yönelik algılarının iyileştirilmesi gibi birkaç alanda iyileştirmeler yapılması gerektiği sonucuna varılabilir.

Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi, öğrencilerin eğitim sürecindeki sosyal aktivitelerini belgelendirmelerini sağlayan bir uygulamadır. Bu sistem, öğrencilerin sadece akademik başarılarına değil, aynı zamanda sosyal becerilerine ve deneyimlerine de odaklanarak, onların kişisel gelişimlerini desteklemektedir. Sosyal transkript, öğrencilere iş başvurularında ve yüksek lisans programlarına başvurularında rekabet avantajı sağlarken, işverenler ve yükseköğretim kurumlarına da öğrencilerin sosyal etkileşim yeteneklerini değerlendirme imkânı sunmaktadır.

## 5.2. Öneriler (Recommendations)

Elde edilen sonuçlara göre geliştirilmiş olan Gazi Üniversitesi Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'yle ilgili yapılabilecek öneriler şu şekilde sıralanabilir:

**Sosyal, Kültürel ve Sportif Faaliyetlerin Artırılması:** Üniversite öğrencileri, sosyal ve kültürel etkinliklerin yetersizliğinden şikâyet etmişlerdir. Özellikle sosyal, sanatsal ve sportif faaliyetlerin sayısı artırılmalı ve farklı kampüslerde de eşit şekilde sunulmalıdır. Etkinliklerin daha fazla öğrenciye ulaşması için daha etkili duyuru stratejileri kullanılmalıdır.

**Sosyal Transkriptin Tanıtımının Geliştirilmesi:** Sosyal Transkript Sistemi'ne olan ilginin bazı fakültelerde düşük olduğu görülmektedir (Tıp, Diş Hekimliği, Eczacılık vb.). Bu fakültelerde müfredat dışı aktivitelerin önemini vurgulayan tanıtım çalışmaları yapılmalı, sistemin öğrencilere sağladığı faydalar daha iyi anlatılmalıdır.

**Arayüz ve Kullanıcı Deneyiminin İyileştirilmesi:** Sistemin arayüzü ve kullanım kolaylığı konusunda bazı olumsuz geri bildirimler alınmıştır. Arayüz daha kullanıcı dostu hale getirilmeli, özellikle dosya yükleme ve belgeleme süreçleri sadeleştirilmelidir. Öğrencilerin sisteme daha kolay erişim sağlayabilmesi için mobil cihazlarla uyumluluk geliştirilmelidir.

**Erişim Problemlerinin Çözülmesi:** Öğrencilerin bir kısmı erişim problemleri yaşadığını belirtmiştir. Bu sorunların incelenip çözülmesi, erişim kolaylığı sağlamak açısından önemlidir. Erişim süreçlerinin iyileştirilmesi, sistemin daha fazla öğrenci tarafından kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

**Etkinliklerin Daha Etkin Tanıtımı:** Öğrenciler etkinlik duyurularının yetersiz olduğunu ifade etmişlerdir. Duyuru stratejileri geliştirilerek, sosyal medya ve dijital platformlar daha etkili kullanılabilir. Afişleme, mail bilgilendirme gibi yöntemlerin yanı sıra, etkinlik takvimi ve anlık bildirimler gibi dijital çözümler artırılmalıdır.

**Puanlama Sisteminin Gözden Geçirilmesi:** Puanlama sistemine ilişkin öğrenciler arasında adaletle ilgili kaygılar bulunmaktadır. Bu sistem gözden geçirilmeli ve bilimsel projeler gibi etkinliklere verilen puanlar gözden geçirilmeli, daha adil bir dağılım sağlanmalıdır. Özellikle etkinliklerde yer alan sorumluluk düzeylerine göre puanlama daha hassas yapılmalıdır.

**Aktivite Çeşitliliğinin Artırılması:** Aktivitelerin çeşitliliği konusunda daha fazla alternatif sunulması önerilmektedir. Sosyal transkripte dahil edilecek farklı türde etkinlikler (ulusal/uluslararası projeler, gönüllü faaliyetler vb.) geliştirilmeli, öğrencilere daha geniş bir yelpazede faaliyet seçenekleri sunulmalıdır.

**Yardım Dokümanları ve Yönergelerin Geliştirilmesi:** Yardım belgeleri ve yönergeler genel olarak yeterli bulunsa da, bazı öğrenciler ek açıklamalar ve yönlendirmeler beklemektedir. Kullanıcılara adım adım rehberlik sağlayacak daha açıklayıcı ve görsel dokümanlar hazırlanmalıdır.

**Sektör Temsilcileri ile İşbirliği:** Sektör temsilcilerinin Sosyal Transkript Sistemini işe alım süreçlerinde dikkate almasının öğrenciler üzerinde teşvik edici bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, üniversite iş dünyası ile iş birliği yaparak Sosyal Transkriptin işverenler tarafından daha fazla tanınması ve kabul görmesi için çeşitli farkındalık projeleri düzenleyebilir.

**Ödüllendirme Sisteminin Geliştirilmesi:** Öğrenciler için puanlara dayalı ödüllendirme sistemlerinin geliştirilmesi (örneğin en yüksek puan alan öğrencilere ödüller verilmesi) motivasyonu artırabilir ve daha fazla öğrencinin sisteme katılımını sağlayabilir.

Bu öneriler, Sosyal Transkript Bilgi Sistemi'nin daha etkili kullanılmasını sağlayabilir ve öğrencilerin kişisel gelişimlerini destekleyerek iş hayatına daha güçlü bir giriş yapmalarına katkıda bulunabilir.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest Statement)

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] AGÜ, "Non-Academic Transkript", *agu.edu.tr*, [Online]. Available: <https://od-tr.agu.edu.tr/nat>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024].
- [2] S. Atmaca, "Designing Extra-curricular Activities: An Intervention Research", *Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 250-275, Mart 2023. doi:10.38151/akef.2023.53
- [3] Ç. Atmaca ve A. Çakır, "Hangi Yönlerimiz Eksik? Hizmet Öncesi İngilizce Öğretmenlerinin Görüşleri", *Eğitim ve Toplum Araştırmaları Dergisi*, vol. 3, no. 1, pp. 1-23, Aralık 2016.
- [4] Z. Ayaz, S. Candan ve M.N. Güngör, "Gazi University Social Transcript Application as an Example of a Good Practice", *20th Erasmus Congress and Exhibition (ERACON 2024)*, Porto, Portugal, 24-28 Haziran, 2024
- [5] BAİBÜ, "BAİBÜ'de Sosyal Transkript Uygulaması Başlıyor", *ibu.edu.tr*, May. 2, 2021. [Online]. Available: <https://ajanda.ibu.edu.tr/baibude-sosyal-transkript-uygulamasi-basliyor>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024].
- [6] A. Bakioglu ve A. Yıldız, "Finlandiya'nın PISA Başarısına Etki Eden Faktörler Bağlamında Türkiye'nin Durumu", *Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi Eğitim Bilimleri Dergisi*, vol. 38, no. 38, pp. 37-53, Mayıs 2014.
- [7] K. R. Bartkus, B. Nemelka, M. Nemelka ve P. Gardner, "Clarifying the meaning of extracurricular activity: A literature review of definitions", *American Journal of Business Education*, vol. 5, no.6, pp. 693-704, Aralık 2012.
- [8] BEÜ, "Sosyal Transkript Yönergesi", *beu.edu.tr*, [Online]. Available: [https://www.beu.edu.tr/Dosyalar/Birimler/134/Formlar/Y%C3%B6nergeler/Sosyal Transkript Y%C3%B6nergesi.pdf](https://www.beu.edu.tr/Dosyalar/Birimler/134/Formlar/Y%C3%B6nergeler/Sosyal%20Transkript%20Y%C3%B6nergesi.pdf). [Erişim Tarihi: 02.09.2024].
- [9] E. Bozpolat ve H. Yıldız, "Türkçe Öğretmenliği Öğrencilerinin Eğitimde Program Dışı Etkinlikler Dersine İlişkin Görüşleri", *Uluslararası Türkçe Edebiyat Kültür Eğitim (TEKE) Dergisi*, vol. 9, no. 4, pp. 1670-1696, Aralık 2020.
- [10] A. B. Broh, "Linking extracurricular programming to academic achievement: Who Benefits and why?", *Sociology of Education*, vol. 75, no. 1, pp. 69-95, Ocak 2002.
- [11] C. Christison, "The benefits of participating in extracurricular activities", *BU Journal of Graduate Studies in Education*, vol. 5, no. 2, 17-20, 2013.

- [12] E. Covay ve W. Carbonaro, "After the bell: Participation in extracurricular activities, classroom behavior, and academic achievement", *Sociology of Education*, vol. 83, no. 1, pp. 20-45, Şubat 2010. <https://doi.org/10.1177/0038040709356565>
- [13] P. Çalışkan ve C. Çetin, "Müfredat Dışı Eğitim Faaliyeti ile İstihdam Edilebilirlik", *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 8, no. 5, pp. 1351-1360, Ekim 2020.
- [14] G. Ü. Senatosu, "G.Ü. Senatosu, Gazi Üniversitesi 2023/176 Sayılı Sosyal Transkript Yönergesi", *gazi.edu.tr*, Haz. 5, 2023. [Online]. <https://webupload.gazi.edu.tr/upload/1050/2023/10/10/fc192453-ef5d-47dc-8d4b-3b4cf7d84929-sosyal-transkript-yonergesi.pdf>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024]
- [15] H. P. Ilhomovna ve D. G. Ismatovna, "The role of extracurricular activities in an educational process", *Journal NX-A*, Special Issue on Application of Science for Sustainable Development to Overcome Covid-19 Pandemic, 335-339, 2020.
- [16] İYTE, "Toplumsal Farkındalık ve Liderlik Belgesi Sistemi (TFLB)", *iyte.edu.tr*, [Online]. Available: <https://iyte.edu.tr/ogrenci/toplumsal-farkindalik-ve-liderlik-belgesi-sistemi-tflb>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024]
- [17] H. Karaaslan ve M. Şen, "Bağımsız Öğrenme Danışmanlığı Birimi Eğitim ve Uygulama Faaliyetleri", *Erzincan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, vol. 21, no. 1, pp. 90-112, Nisan 2019. doi:10.17556/erziefd.450474
- [18] A. Kocayigit ve N. Ekinci, "Ortaöğretim Okullarında Uygulanan Program Dışı Etkinliklerin Öğretmen Görüşlerine Göre Değerlendirilmesi", *OPUS International Journal of Society Researches*, vol. 16, no. 29, pp. 1810-1848, Eylül 2020. doi:10.26466/opus.749109
- [19] R. W. Larson, D. M. Hansen ve G. Moneta, "Differing profiles of developmental experiences across types of organized youth activities", *Developmental Psychology*, vol. 42, no. 5, pp. 849-863, Eylül 2006. doi:10.1037/0012-1649.42.5.849
- [20] A. Martinez, C. Coker, S. D. McMahon, J. Cohen ve A. Thapa, "Involvement in extracurricular activities: Identifying differences in perceptions of school climate", *The Educational and Developmental Psychologist*, vol. 33, no. 1, pp. 70-84, Nisan 2016. doi:10.1017/edp.2016.7
- [21] E. Massoni, "Positive effects of extra curricular activities on students", *ESSAI-The College of DuPage Anthology of Academic Writing Across the Curriculum*, vol. 9, no. 27, pp. 84-87, Nisan 2011. <http://dc.cod.edu/essai/vol9/iss1/27>
- [22] G. R. Morrison, S. M. Ross, J. E. Kemp ve H. Kalman, *Designing effective instruction*, John Wiley ve Sons, 2010
- [23] J. Nielsen, *Usability Engineering*, Academic Press Limited, London, 1993, ISBN 0-12-518406-9
- [24] Ü. G. Orhan, A. Seis, M. Gel ve F. Evran Acar, "Ekstra Program Etkinlikleri ve Öğrencilere Katkısı", *Türk Eğitim Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 1, pp. 660-686, Nisan 2024. doi:10.37217/tebd.1334666
- [25] Ready Nation, "Social-emotional skills in early childhood support workforce success", *strongnation.org*, Nisan 3, 2017. [Online]. Available: <https://www.strongnation.org/articles/393-social-emotionalskills-in-early-childhood-support-workforce-success>. [Erişim Tarihi: 09.09.2024]
- [26] S. Shamsudin, S. Ismail, A. Mamun, N. Sayed ve K. Sayed, "Examining the Effect of Extracurricular Activities on Academic Achievements among the Public University Students in Malaysia", *Asian Social Science*, vol. 10, pp. 171-177, Mart 2014. doi:10.5539/ass.v10n9p171
- [27] N. Saqib, M. A. Raheem, M. Iqbal, M. Salman ve T. Shahzad, "Effects of extracurricular activities on students.", *National University of Science and Technology*, pp. 1-22, Ocak 2018.
- [28] P. Seow ve G. Pan, "A Literature Review of the Impact of Extracurricular Activities Participation on Students' Academic Performance", *Journal of Education for Business*, vol. 89, no. 7, pp. 361-366, Eylül 2014. doi:10.1080/08832323.2014.912195
- [29] E. Sönmez ve M. Pektaş, "Ortaokul Öğrencilerine Müfredat Dışında Uygulanan Bazı Biyoteknoloji Etkinliklerinin Bilimin Doğası Görüşleri ve Biyoteknoloji Bilgilerine Etkisi", *Kastamonu Education Journal*, vol. 25, no. 5, pp. 2019-2036, Eylül 2017.
- [30] E. Stearns ve E. J. Glennie, "Opportunities to participate: Extracurricular activities' distribution across and academic correlates in high schools", *Social Science Research*, vol. 39, no. 2, pp. 296-309, Mart 2010. doi:10.1016/j.ssresearch.2009.08.001
- [31] SUBÜ, "'Sosyal Transkript' avantaj sağlayacak", *subu.edu.tr*, [Online]. <https://haber.subu.edu.tr/index.php/tr/node/752>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024]
- [32] N. Tariq, "Effects of Extracurricular Activities on Students, Department of Electrical Engineering College of Electrical and Mechanical Engineering", *National University of Sciences and Technology*, 2018
- [33] T. Tullis ve B. Albert, *Measuring the User Experience Chapter 3-Planning a Usability Study*, In Interactive Technologies, Editor(s): Tom Tullis, Bill Albert, Morgan Kaufmann, pp. 45-62, 2008, ISBN 9780123735584, doi:10.1016/B978-0-12-373558-4.00003-0.
- [34] F. Uysal, "A Study on the Benefits of Extracurricular Activities for Prospective Teachers Using the Pairwise Comparison Approach", *Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Dergisi (AKEF) Dergisi*, vol. 5, no.1, pp.237-249, Ekim 2023.
- [35] F. Uysal, "Öğretmen Adaylarının Bakışıyla Program Dışı Etkinlikler", *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü*

*Dergisi*, vol. 10, no. 13, pp. 88-109, Aralık 2022.

[36] F. Uysal ve N. Kısa, "Covid-19 pandemi döneminde ilkökul web sayfalarının program dışı etkinlikler bağlamında incelenmesi: Burdur ili örneği", *Kocaeli Üniversitesi Eğitim Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 398-415, Kasım 2021. doi:10.33400/kuje.913535

[37] F. Uzun ve Y. Bolat, "Program Dışı Etkinliklerin Öğrenci Gelişimine Etkisi", *Harran Maarif Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 14-35, Haziran 2023. doi:10.22596/hej.1244118

[38] F. Wang ve M. J. Hannafin, "Design-based research and technology-enhanced learning environments", *Educational Technology Research and Development*, vol. 53, no.4, pp. 5-23, Aralık 2005.

[39] D. Yıldız, "Bilgi Sistemi Yazılım Geliştirme Yaşam Döngüsü Safhalarından Gereksinim Belirleme ve Sistem Tasarımında Kalite Odaklılık: Üç Proje İncelemesi", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 15, no. 1, pp. 55-64, Ocak 2022. doi:10.17671/gazibtd.871411

[40] M. Yüksel, "Performans Değerlendirmesine Çok Ölçütlü Bütünleşik Bir Yaklaşım", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 30, no. 3, pp. 429-441, Eylül 2015.

[41] ZBEÜN, "Sosyal Transkript Uygulaması Duyurusu", *beun.edu.tr*, Mart 16, 2022. [Online]. Available: <https://ubyo.beun.edu.tr/duyurular/sosyal-transkript-uygulamasi-duyurusu.html>. [Erişim Tarihi: 02.09.2024]

[42] Y. S. Lincoln ve E. G. Guba, *Naturalistic Inquiry*. Sage Publications, Haziran 1985

[43] M. Meyliana, Y. U. Chandra, C. Cassandra, S. Surjandy, E. Fernando, H. A. E. Widjaja ve H. Prabowo, "Education Value Chain Model for Examination, Grading, and Evaluation Process in Higher Education based on Blockchain Technology", *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 1698-1703, Aralık 2020.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Effect of Dimensional Differences on Tensile Strength in Tensile Test Specimens

Emre Kanlı <sup>a</sup>, Furkan Parmaksız <sup>\*b</sup>, Oğuz Koçar <sup>c</sup>, Faruk Mert <sup>d</sup>, Nergizhan Anaç <sup>e</sup>

Submitted: 22.11.2024 Revised: 10.12.2024 Accepted: 27.12.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR13

### ABSTRACT

**Keywords:** Standard tensile test, miniature tensile test, fused deposition modeling, stereolithography, mechanical properties

<sup>a</sup> Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 67100 - Zonguldak, Türkiye  
Orcid: 0009-0009-2636-202X  
e mail: emreknli@hotmail.com

<sup>b\*</sup> Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 67100 - Zonguldak, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7002-9157

<sup>c</sup> Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 67100 - Zonguldak, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-1928-4301

<sup>d</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt University, Technical Sciences Vocational School, Dept. of Computer Sciences 06938 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7298-6225

<sup>e</sup> Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 67100 - Zonguldak, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-6738-9741

\*Corresponding author:  
f.parmaksiz@beun.edu.tr

Tensile testing is one of the most common mechanical tests performed to understand the properties of materials. Tensile testing is performed to determine elastic and plastic material properties under static load. This method provides helpful information for designers and manufacturers to develop new materials. In tensile tests used for various conditions, there are tensile test specimens of different sizes and shapes. However, in recent years, there has been an increased interest in miniaturized tensile specimens and micro-tensile testing applications instead of standard tensile testing and standard tensile specimens used to determine the mechanical properties of materials. Due to the reduction of test specimen sizes, it is possible to reduce the amount of material, production cost and the time taken for specimen preparation. When the literature is reviewed, it is observed that the downsizing of test specimen dimensions is mostly performed for metal parts. However, in tests conducted to examine the mechanical properties of plastic parts produced by additive manufacturing methods, the amount of material used, and consequently the resulting waste, is also high. In this study, miniature and standard tensile test specimens were produced using additive manufacturing methods (Fused Deposition Modeling and Stereolithography). A mini tensile mold was designed and fabricated for mini tensile tests. The results showed that mini tensile test specimens can be used instead of standard tensile test specimens.

### Çekme Testi Numunelerinde Boyutsal Farklılıkların Çekme Dayanımına Etkisi

#### ÖZ

Malzemelerin özelliklerini anlamak üzere yapılan en yaygın mekanik testlerden biri çekme testidir. Çekme testi; statik yük altındaki elastik ve plastik malzeme davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Tasarımcıların ve üreticilerin yeni malzemeler geliştirmesinde yardımcı bilgi sağlar. Çeşitli şartlar için kullanılan çekme testlerinde, farklı boyut ve şekillerde çekme test numuneleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan standart çekme testi ve standart çekme numuneleri yerine minyatür boyutta çekme numunelerine ve mikro çekme testi uygulamalarına ilgi artmıştır. Test numune boyutlarının küçültülmesi sayesinde malzeme miktarını, süreyi ve üretim maliyetini azaltmak mümkündür. Literatür incelendiğinde çoğunlukla metal parçalar için test numune boyutlarını küçültme işleminin gerçekleştirildiği görülmektedir. Bununla birlikte, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen plastik parçaların mekanik özelliklerini incelemek için yapılan testlerde de kullanılan malzeme ve dolayısıyla ortaya çıkan atık miktarı yüksektir. Bu amaçla yapılan çalışmada, eklemeli imalat yöntemleri (Eriyik Yığma Modelleme ve Stereolitografi) kullanılarak minyatür ve standart çekme test numuneleri üretilmiştir. Mini çekme testleri için bir mini çekme kalıbı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sonuçlar, standart çekme test numuneleri yerine mini çekme test numunelerinin kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Standart çekme testi, Minyatür çekme testi, Eriyik yığma modelleme, Stereolitografi, Mekanik özellikler



## 1. Introduction

Engineering projects are costly technological works that are often undertaken to solve problems involving people and the environment. If engineering works fail, the negative impact of the consequences will be much greater than the failure of a system used for simple needs in everyday life. For this reason, it is very important to have clear and accurate information about the strength of the materials used in such works. Some mechanical tests are performed to determine the strength of materials and learn their properties. These tests vary widely depending on the load on the material, including tensile, compression, hardness, bending, torsion, notch impact, fatigue and creep tests. One important criterion in these tests is that the test specimen should accurately represent the original material. Additionally, ensuring that the material or part to be tested is subjected to similar conditions as those it will face in its actual use will also increase the reliability of the test results. One of the most basic tests widely used in engineering is the tensile test. Tensile testing is a practical test used to understand the mechanical properties of different material groups such as metals, ceramics, polymers or composites. The tensile testing machine consists of two jaws that can move up and down relative to each other. One of the jaws is moved at a constant speed and a variable amount of tensile force is applied to the test piece and the elongation corresponding to this force is recorded. During the tensile process, the test material is subjected to force in one axis. The tensile test ends when the material is ruptured and fractured.

Tensile testing is a destructive test and therefore it is not possible to use the specimens for any other purpose after the test. The specimens that break or rupture at the end of the tensile test are not reusable. To reduce the amount of material required for this test and to save the time spent in preparing tensile test specimens, the idea of reducing the specimen size has emerged [1]. Non-standard tensile test specimens, called small, mini or miniature, have attracted the attention of researchers because they offer the opportunity for the development of new materials (allowing the production of small quantities of materials in a laboratory environment) and have advantages such as the use of small volumes of material. Mini-tensile testing has been used for localized determination of material properties [2, 3] and as an evaluation tool to validate the results of finite element models [4]. Furthermore, when tensile testing of radioactively irradiated material is required, it has become almost mandatory to use small or miniaturized specimens instead of using conventional tensile specimens [5, 6]. Whereas the first standard for conventional tensile testing and tensile test specimens was published in 1904 [7], there is yet no standard for miniature tensile testing and specimens. Nevertheless, the fabrication of miniature tensile test specimens, appropriate test methodologies and test results have been extensively discussed in various research [8].

Kumar et al. [9] compared the mechanical properties of miniature and sub-size tensile test specimens with the test results obtained from a conventional size specimen. They supported their tests with finite element analysis to determine the geometrical design of the miniature specimen and its behavior under tensile loading.

Kihara et al. [10] evaluated micro specimens by micro tensile testing. In their study, the micro-tensile test method was performed using specimens with two different crystal orientations. They stated that the results they presented suggest that their proposed micro-tensile test can be applied to evaluate the crystal anisotropy of micro-components composed of nickel or other non-crystalline materials.

Konopik et al. [11] investigated the applicability of micro-tensile testing for DC01 steel material characterization, the results of micro-tensile test specimens were compared with standard sized specimens. The results showed good agreement between the values obtained using standard and micro-tensile test specimens for all parameters and conditions considered in the experiments.

In another study [12], the dynamic mechanical properties of S355JR, S235JR and 1.4301 (X5CrNi18-10) steel sheet materials were compared with the results obtained from miniaturized tensile tests and standard tensile tests. In a similar study [13], the use of miniaturized tensile specimens was evaluated to understand the mechanical properties of DP800, DP600 and 316L stainless steel alloys developed by rapid alloy prototyping. The study concluded that miniaturized tensile testing can be safely used as a highly efficient tool for predicting standard mechanical properties of various steels.

In this study, two different types of mini tensile test specimens were produced using two different 3D printing techniques, Stereolithography (SLA) and Fused Deposition Modeling (FDM). According to a review of the literature, it has been observed that studies have been focused on reducing the size of standard tensile test specimens for metal-based materials in generally [14, 15]. However, no reference studies have been found related to modifying the tensile specimen dimensions for plastic materials in this field. Nowadays, for all material groups, specimen preparation time and the cost impact of specimens are important. The absence of a specific standard defining the dimensions of mini tensile test specimens has led to experiments being conducted with miniature specimens of varying sizes, determined based on user requirements and the availability of the material to be tested. Researchers, particularly in cases involving valuable and scarce materials, are working to reduce tensile specimen sizes to minimize material waste. Mini-tensile tests are particularly advantageous for testing parts produced using new manufacturing techniques such as additive manufacturing. SLA and FDM 3D printers primarily utilize plastic materials. Reducing the amount of material used in test specimens produced by these methods will not only decrease waste but also lower production costs. For this reason, reducing the amount of material consumed is of great importance. Thus, tensile test specimens are produced in the form of small-sized parts, significantly reducing material consumption and specimen preparation time. In this study, the applicability of mini tensile testing was evaluated by comparing the mini tensile test results of materials produced using 3D manufacturing technologies with standard tensile test results.

## 2. Material and Methods

The steps followed in the study are shown step by step in the flowchart given in Figure 1. The first step of the study was to recognize the problem through literature research and then to decide on the methods of the processes to be applied. After determining the method of the study, the printing process of standard and mini tensile bars was realized. A mini mold was designed and manufactured to connect the mini tensile bars to the tensile testing machine. Finally, the tensile process was completed, and the fracture surfaces of the specimens were examined. The usability of the mini tensile test was investigated by comparing the mini tensile test results with the standard tensile test results.

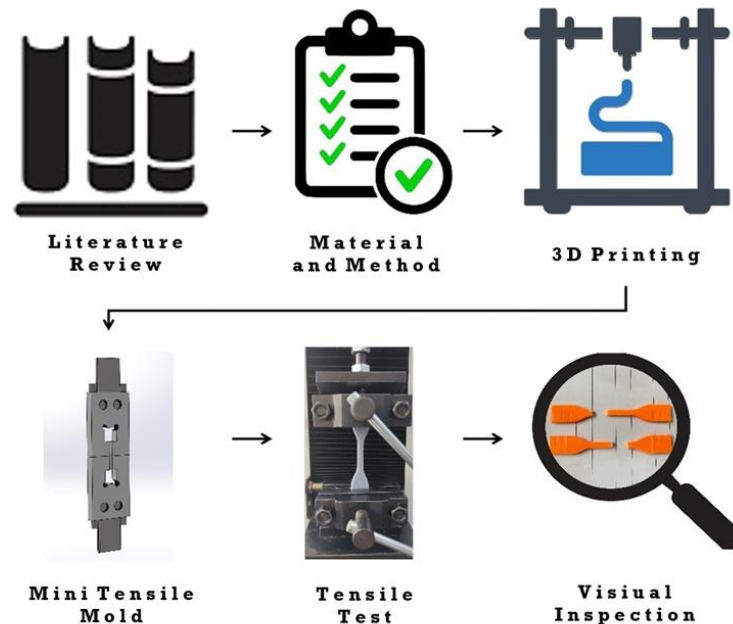


Figure 1. Flowchart of the experiment

### 2.1. Material

In the study, PLA + (PLA Plus) filament material produced by ESUN brand with a diameter of 1.75 mm and UV liquid resin produced by Anycubic brand were used. Table 1 shows the mechanical properties of PLA Plus and Table 2 shows the mechanical properties of UV liquid resin.

PLA (polylactic acid) is one of the most widely used filament types in 3D printers. This is due to its ease

of production, affordable price, and easy availability. PLA material is manufactured from organic materials such as corn starch and sugar cane. It is not harmful to human health and is biodegradable [16, 17]. Since PLA has good compatibility with filler materials, many derivatives such as PLA Plus 2% calcium carbonate containing polylactic acid), PLA Tough, PLA CF (carbon fibre-reinforced polylactic acid) and PLA GF (glass fibre-reinforced polylactic acid) are produced. PLA types are variations of standard PLA with enhanced mechanical properties. They are produced to meet the needs of different applications. For example, the PLA Plus material has a higher toughness and better adhesion between the layers than PLA. PLA Plus improves PLA's weaknesses such as moisture absorption and brittleness. Because of these advantages, PLA Plus material was chosen for the parts produced on the 3D printer.

Table 1. Mechanical properties of PLA Plus material [18]

Mechanical Properties	PLA Plus
Filament diameter (mm)	1.75
Color	Orange
Tensile strength (MPa)	63
Elongation at Break (%)	20
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.23

The UV resin used in the study has low odor, high dimensional accuracy, excellent adhesion, low shrinkage, high printing resolution, and high surface roughness. This type of resin is used for the production of designs such as figures, detailed models, prototypes, and structures with a good appearance [15].

Table 2. Mechanical properties of UV liquid resin [19]

Mechanical Properties	UV Resin
Wavelength (nm)	405
Viscosity (mPa.s) 25°C	150-200
Elongation (%)	8-12
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.05-1.25
Tensile strength (MPa)	36-45
Hardness (Shore D)	82
Volumetric shrinkage (%)	4.5-5.5

## 2.2. Printing Process and Printing Parameters

The tensile specimens used in the study were produced using two different additive manufacturing methods. The first additive manufacturing method is Fused Deposition Modeling. FDM is an extrusion-based manufacturing method that creates 3D geometries layer by layer using thermoplastic polymers as consumables [20]. The second additive manufacturing method is Stereolithography, which uses liquid, photosensitive(photopolymer) resin as a consumable material and solidifies the 3D designed part on top of each other with the photopolymerization technique of the resin and has high dimensional accuracy [21, 22].

For the FDM method, 3D printing was performed using the Ender-3 S1 model printers produced by Creality. For the SLA method, Photon Mono X 6K printer manufactured by Anycubic was used. Both devices used in the study are shown in Figure 2. Since the parts produced with the SLA method needed to be subjected to an extra post-processing, they were exposed to UV light in the curing device. For the curing process, the Anycubic Wash & Cure device was operated for 10 minutes for both surfaces of the part.

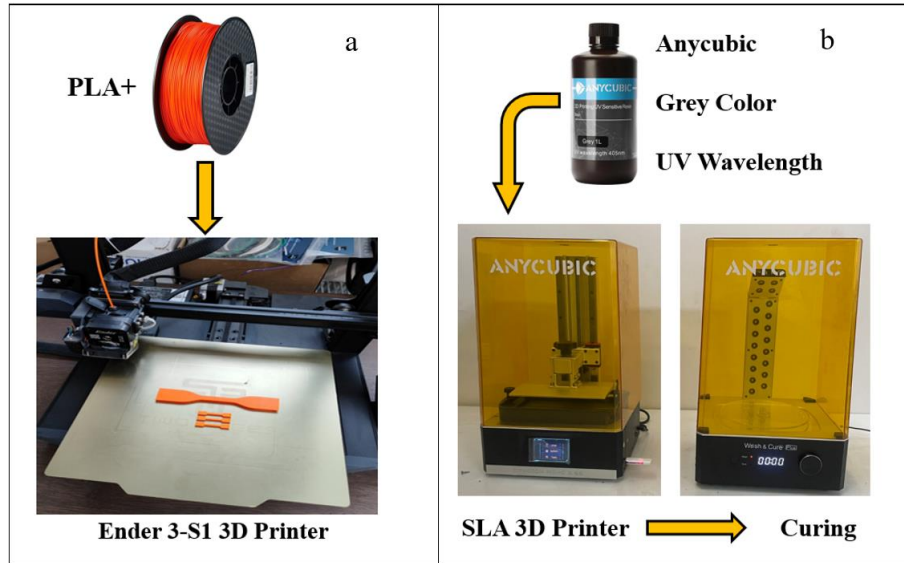


Figure 2. a) Ender 3 S-1, b) Anycubic Photon Mono X 6K and Anycubic Wash & Cure

In the parts produced by the FDM method, the printing parameters were adjusted by considering the recommendation of the filament manufacturer before printing from the 3D printer. Printing parameters of the process are as given in Table 3.

Table 3. Printing parameters for FDM method

Printing Parameters (FDM)	
Printing speed (mm/s)	50
Plate temperature (°C)	60
Printing temperature (°C)	207
Layer thickness (mm)	0.1
Infill percentage (%)	100

For the SLA method, gray standard UV resin of Anycubic brand was used. The parameters used for SLA printing are given in Table 4. The 3D drawings of the specimens were made by using the "SolidWorks" software and then saved in STL file format. Using the "Chitubox" slicing software for SLA prints and "Cura" slicing software for FDM prints, G codes of the samples were extracted in accordance with the parameters used during printing.

Table 4. Printing parameters for SLA method

Printing Parameters (SLA)	
Exposure time (s)	2
Layer thickness (mm)	0.05
Lifting distance (mm)	2
Lifting speed (mm/min)	60
Infill percentage (%)	100

### 2.3. Tensile Test Standards

The dimensions of mini tensile test specimens encountered in various studies in the literature are given in Table 5 and the dimensions of mini tensile and standard tensile specimens used in this study are given in Figure 3. As seen in Table 5, researchers have prepared mini and standard tensile test specimens of various sizes from metal materials. It has been observed that the dimensions of mini specimens were determined in a way that allows sampling regionally from parts used in applications. The reason for the dimensional differences in these studies is the absence of a standard for mini tensile testing and the researchers' aim to investigate the relationship between specimen size and strength. In the literature, ASTM D638 Type IV tensile test specimens are generally preferred for mechanical testing of polymer materials produced by additive manufacturing [23-25]. Therefore, ASTM D638 Type IV standards were used for the dimensions of standard specimens in this study. However, since no definite standard is defined for additively manufactured polymer mini-tensile specimens, other studies in the literature were taken into consideration. Figure 3a shows the dimensions of the [26] standard tensile

specimen and Figure 3b shows the dimensions of the mini tensile bar. In the study, five standard tensile specimens and five mini tensile specimens were produced for each of the FDM and SLA methods. In total, 10 tensile specimens made from PLA and 10 tensile specimens made from UV resin were subjected to tensile testing. In the FDM method, 2.77 m of filament material was used to produce standard tensile bars and 0.11 m of filament material was used to produce mini tensile bars. In the specimens produced by SLA method, 0.30 g of resin was used in mini tensile bars and 8.30 g of resin was used in standard tensile bars. Approximately 25 times more filament was used between the mini and standard tensile specimens for the FDM method and approximately 27 times more resin was used for the SLA method.

Table 5. Dimensions of different mini tensile test specimens in the literature (all dimensions are in mm)

Material	Dimension
S355JR, S235JR and 1.4301 [12, 27]	
Stainless Steel 316 [5]	
20MnNiMo55 CrMoV SS304 LN [9]	
Steel sheet made of DC01[3]	
Nagase XNR 6852-1 and SikaPower 4720 [28]	
Steel [4]	
6061 Al Alloy 304 L FeCrAl Alloy 718-Alloy Tungsten [6]	
Stainless Steel 316L [29]	



The thickness of the mini-sized specimens was reduced compared to the standard specimens. This can be attributed to the fact that all dimensions of the model were reduced. In addition to the reductions in length and width, the thickness also decreased. Since the material used in the study can be enlarged and reduced according to the practical application area, the thicknesses may change in the application part. In addition, the distribution of the forces acting on the material in the cross-sectional area and the stress distribution on the material with reduced size are closer than the standard specimen.

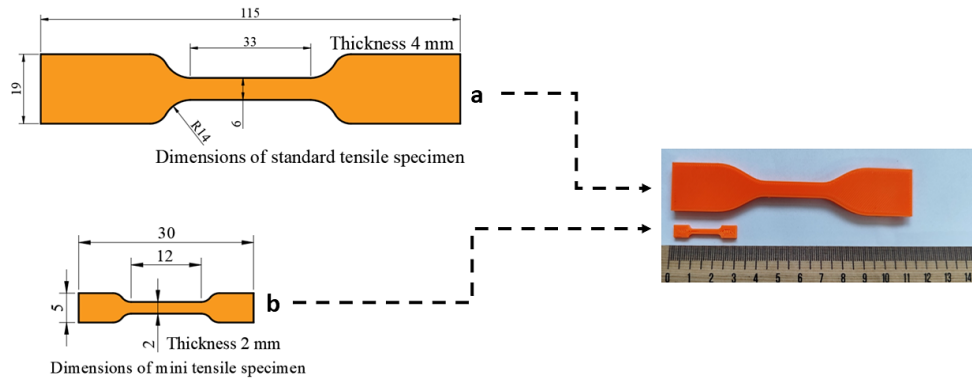


Figure 3. a) Dimensions of standard tensile specimens, b) Dimensions of mini tensile specimens

#### 2.4. Design and Manufacturing of Mini Tensile Mold

Tensile testing machines and their fixtures are designed for standard tensile specimens. Therefore, a different fixture is needed to mount mini tensile specimens to the tensile testing machine. For this reason, a mini tensile test mold was designed for the study and this mold is shown in Figure 4. The mini tensile mold consists of two centering pins and two connection flat bars at the top and bottom. The profile in which the tensile bar will be placed on the upper and lower parts was cut using a wire EDM machine. Flat bars are used for connecting the mini tensile test mold to the tensile machine.

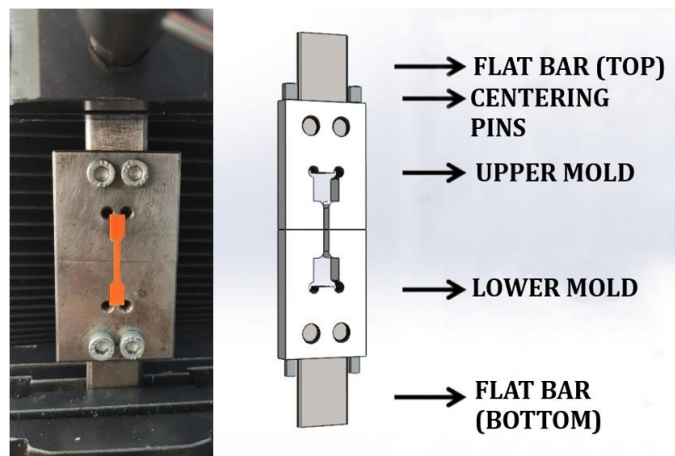


Figure 4. Mini tensile mold

#### 2.5. Tensile Testing Machine

WDW-5 model universal tensile machine (Figure 5) with a capacity of 5 kN was used for the tensile tests performed in the study. Tensile tests were performed at room temperature at a tensile speed of 2 mm/min. While no extra equipment was used for the standard tensile test bars, the mini tensile bars were pulled using a mini tensile mold.



Figure 5. WDW-5 model universal tensile machine

### 3. Results and Discussion

When the results of the tensile test were analyzed (Figure 6), the average mini tensile strength value for PLA Plus was  $49.68 \pm 3.64$  (MPa), while the average tensile strength of the standard tensile specimens was  $47.83 \pm 4.82$  (MPa). The percentage error between the results of the average tensile strength of the mini and standard tensile bars using PLA Plus is calculated as 3.8%. When the percentage elongation is evaluated in Figure 7, the average of the mini tensile bars is  $4.7 \pm 1.02\%$  while the average of the standard tensile bars is  $8.20 \pm 1.89\%$ . The difference between the average of mini and standard tensile bars in percent elongation was calculated as 57.31%.

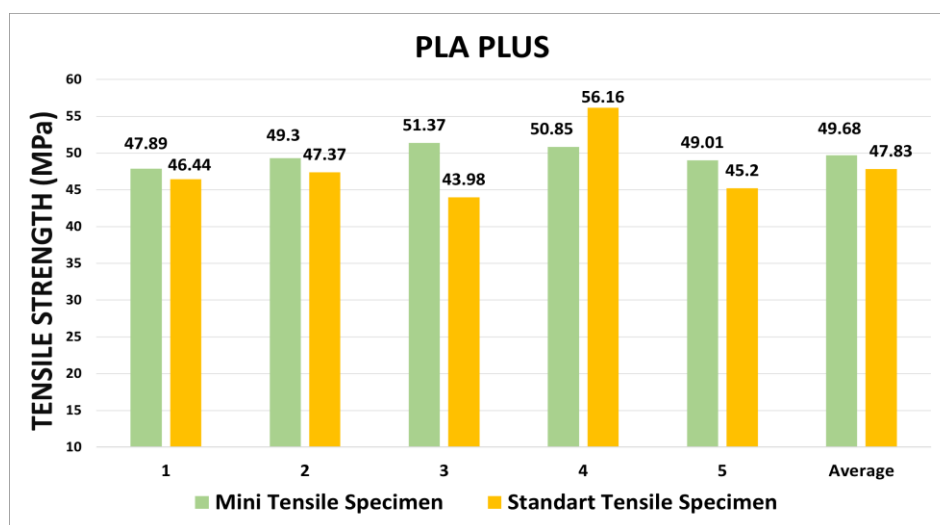


Figure 6. Tensile strength results of PLA Plus specimens

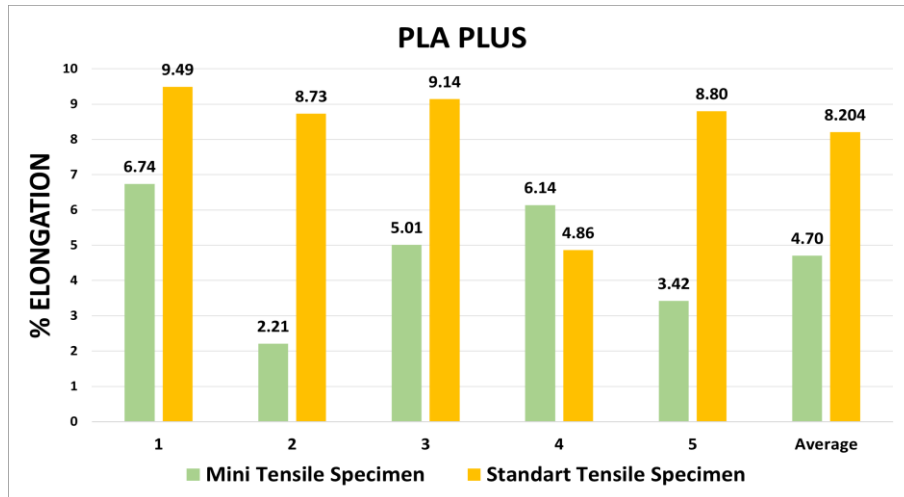


Figure 7. Percent elongation results of PLA Plus

In Figure 8, the average tensile strength of the mini tensile bars produced by the SLA method was  $21.06 \pm 4.96$  MPa, while the average tensile strength of the standard tensile specimens was  $20.28 \pm 2.42$  MPa. The percent error between them was calculated as 3.8%. When the percent elongation was analyzed in Figure 9, the average of the mini SLA tensile bars was  $1.29 \pm 0.71\%$  while the average of the standard tensile bars was  $4.5 \pm 0.43\%$ .

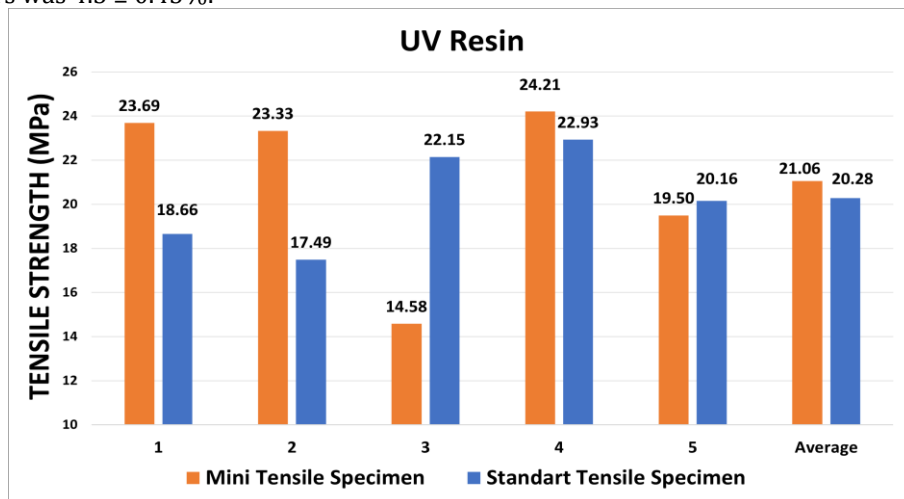


Figure 8. Tensile strength results of UV Resin specimens

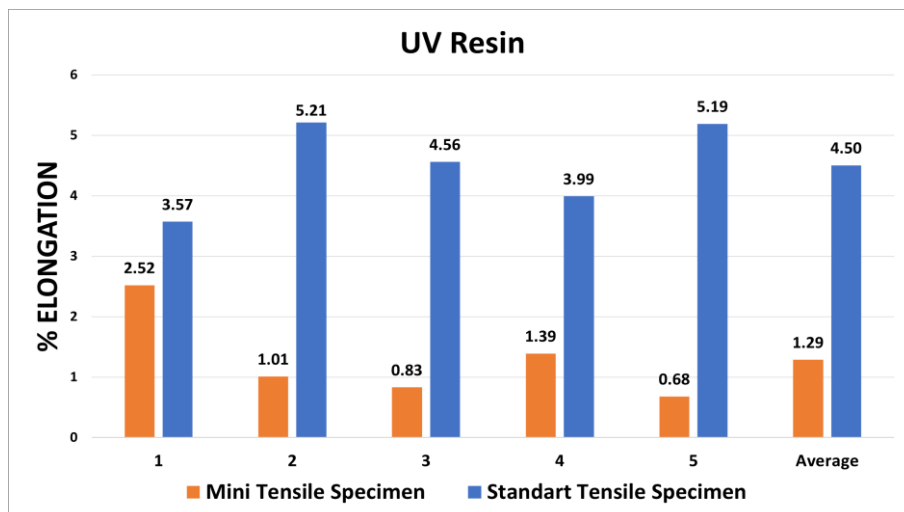


Figure 9. Percent elongation results of UV Resin specimens

The maximum, minimum and standard deviation values obtained as tensile stress and % elongation of mini and standard tensile specimens produced by FDM and SLA methods are given in Table 6. The elongation values obtained from the mini specimens are less than the standard specimens for both materials. This is assumed to be due to both material and geometrical inhomogeneity (thickness) [30].

Table 6. Maximum and minimum tensile strength results

		PLA Plus		UV Resin	
		Mini	Standard	Mini	Standard
Tensile strength	Maximum	51.37	56.16	24.21	22.93
	Minumum	47.89	43.98	14.58	17.49
	Standard Dev.	1.42	4.83	4.07	0.74
%Elongation	Maximum	6.74	9.49	2.52	5.21
	Minumum	2.21	4.86	0.68	3.57
	Standard Dev.	1.88	1.89	2.89	1.56

### 3.1. Visual Inspection Results

The standard and mini tensile test SLA specimen samples are shown in Figure 10. It was observed that the standard and mini tensile bars ruptured in the central zone. When the fracture surfaces of the tensile specimens are observed, the specimens are brittle. When the fracture surfaces of the standard and mini tensile bars are compared, it can be said that the fracture surfaces are similar.

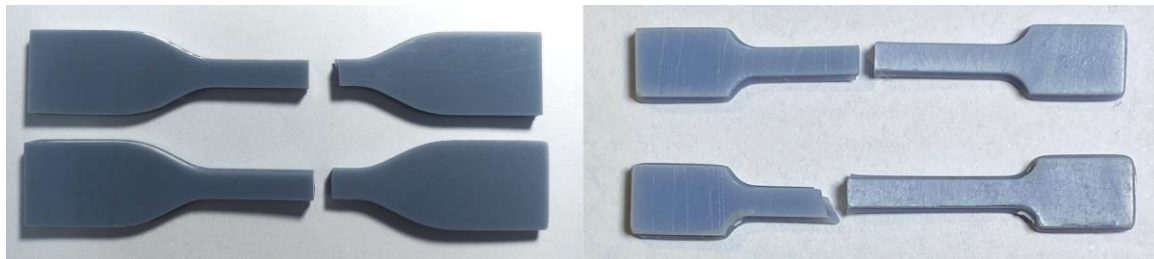


Figure 10. Standard and mini SLA tensile test specimens

The standard and mini PLA plus tensile test specimens are shown in Figure 11. When the specimens are examined, it is noteworthy that the rupture points and fracture surfaces of the specimens in both sizes are similar. When the rupture points are evaluated, it is understood that the materials have a ductile structure due to the visible necking in the tensile specimens of both sizes.

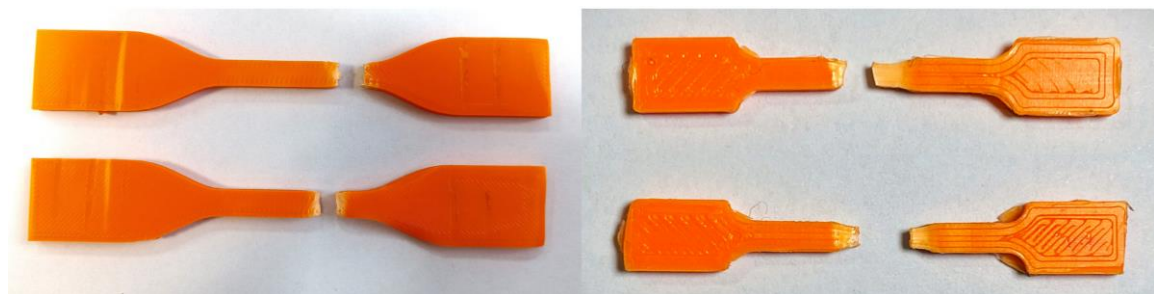


Figure 11. Standard and mini PLA Plus tensile test specimens

## 4. Conclusion and Suggestions

In order to assess the applicability of mini-tensile specimens as a substitute for standard tensile specimens in tensile testing, tensile strength and elongation values must be comparable. For this reason, there is an international standardization effort of miniature specimen technology. Due to the small dimensions of the mini-tensile specimen, elongation measurements are often performed using the cross-head movement of the instrument instead of an extensometer. It is possible that specimens with different dimensions, such as mini and standard tensile specimens, are geometrically similar, thus reducing the difference in elongation properties [9]. Nevertheless, the difference between the total elongation values may be due to the fact that the thickness/width ratio of the specimens is not the same

[3,9]. It is also possible to obtain accurate results by controlling the surface quality and size of the tensile test specimens or by taking more precise elongation measurements.

In this study, it was observed that the dimensional difference between mini tensile test specimens and standard tensile test specimens had minor effect on tensile strength. The difference in the mean tensile strengths of the mini and standard tensile test bars produced by the FDM method is 3.8%, while the difference in the mean tensile strengths of the tensile test bars produced by the SLA method is 3.8%. In the parts produced by the FDM method, it was observed that the fracture surfaces were similar and the mini and standard tensile test specimens fractured in a ductile manner. In the specimens produced by the SLA method, it was observed that the fracture surfaces were similar and the mini and standard tensile test specimens fractured in a brittle manner.

Mini tensile test specimens are generally preferred for metal-based materials with small geometries, such as those used in fusion reactor applications in nuclear plants or laser welding [31, 32]. However, the application areas of mini tensile specimens for plastic materials are not yet well-defined. Nevertheless, it is believed that mini tensile specimens printed using SLA and 3D printers could provide significant advantages in terms of cost and project duration, especially for budget-constrained research. Additionally, it is anticipated that obtaining reliable results from mini tensile tests could lead to discussions about reducing specimen sizes for other mechanical tests in the future.

The existence of a standard for tensile test specimens makes it possible to compare studies in literature. However, the high cost of specimen preparation and the limitations of specimen dimensions do not allow easy testing in all cases. In the mini-tensile test, the specimens can be compared in terms of their mechanical properties, but it is not very efficient to compare them with other studies. This is because the mini-tensile test is becoming more widespread, but it is not fully standardized. Therefore, researchers should consider the advantages and disadvantages of both specimen sizes and choose the appropriate one.

Today, the production of parts using 3D printers and SLA technology is highly popular for both industrial and everyday use. The continuous development of filament and resin materials has significantly contributed to this rise. However, the costs of SLA resins (particularly those used in medical applications) and engineering-grade filaments remain very high. Reducing the amount of material consumed during production would lower costs, making it beneficial to focus on standardization in this area in the long term. To outline steps toward standardization in the mini tensile testing process for plastic materials, it is first necessary to increase the number of studies conducted with these materials. To achieve this, the initial step should involve identifying the relevant industries and the key polymer materials used in these sectors. The next step would be to decide on the production method for the material. This entire process should be planned and executed collaboratively with relevant institutions and scientists.

## Acknowledgment

The authors have not received any support for the research, authorship or publication of this study.

## Conflict of Interest Statement

There are no declared conflicts of interest or common interests.

## References

- [1] B. N. Jaya and M. Z. Alam, "Small-scale mechanical testing of materials," *Current Science*, vol. 105, no. 8, pp. 1073-1099, Oct. 2013.
- [2] Y. Kaya, "An Investigation on Joinability of The AISI 304 And AISI 430 Stainless Steel by Tig, Mig and Shielded Metal Arc Welding Methods," *Gazi University Faculty of Engineering and Architecture Journal*, vol. 25, no. 3, Feb. 2010.
- [3] J. Džugan, M. Rund, A. Prantl, and P. Konopík, "Mini-tensile specimen application for sheets characterization," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 179, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/179/1/012020
- [4] J. Džugan, P. Konopik, M. Rund, and R. Prochazka, "Determination of local tensile and fatigue properties with the use of sub-sized specimens," in *Pressure Vessels and Piping Conference*, 2015, vol. 56925: American Society of Mechanical Engineers, p. V01AT01A066. doi: 10.1115/PVP2015-45958.



- [5] A. V. Kolhatkar, V. Karthik, R. Divakar, A. Kumar, and J. Joseph, "Development of Ultra Sub-size Tensile Specimen for Evaluation of Tensile Properties of Irradiated Materials," *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)*, Yekaterinburg, Russian Federation, June 26–29, 2017. doi:10.1520/stp164420210121
- [6] M. N. Gussev, R. H. Howard, K. A. Terrani, and K. G. Field, "Sub-size tensile specimen design for in-reactor irradiation and post-irradiation testing," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 320, pp. 298-308, Aug. 2017. doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.06.008
- [7] B. S. Institution, "British Standard Method for a Tensile Testing of Metals (including aerospace materials)," knowledge.bsigroup.com, 1987. [Online]. Available: <https://knowledge.bsigroup.com/products/method-for-tensile-testing-of-metals-including-aerospace-materials?version=standard>. [Accessed: Sept. 10, 2024].
- [8] Y. Kohno, A. Kohyama, M. L. Hamilton, T. Hirose, Y. Katoh, and F. A. Garner, "Specimen size effects on the tensile properties of JPCA and JFMS," *Journal of nuclear materials*, vol. 283, pp. 1014-1017, Dec. 2000. doi: 10.1016/S0022-3115(00)00245-2
- [9] K. Kumar et al., "Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties," *Procedia engineering*, vol. 86, pp. 899-909, 2014. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.112
- [10] Y. Kihara, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, H. Hosoda, S. Tatsuo, and M. Sone, "Tensile behavior of micro-sized specimen made of single crystalline nickel," *Materials Letters*, vol. 153, pp. 36-39, Aug. 2015. doi : 10.1016/j.matlet.2015.03.119
- [11] P. Konopik, P. Farahnak, M. Rund, J. Džugan, and S. Rzepa, "Applicability of miniature tensile test in the automotive sector," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 461, no. 1: IOP Publishing, p. 012043. doi: 10.1088/1757-899X/461/1/012043
- [12] M. Rund, R. Procházka, P. Konopík, J. Džugan, and H. Folgar, "Investigation of sample-size influence on tensile test results at different strain rates," *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 410-415, Sep. 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.086
- [13] L. Zhang, W. Harrison, M. A. Yar, S. G. Brown, and N. P. Lavery, "The development of miniature tensile specimens with non-standard aspect and slimmness ratios for rapid alloy prototyping processes," *Journal of materials research and technology*, vol. 15, pp. 1830-1843, Nov. 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.029
- [14] Y. Zhang, S. Karnati, T. Pan, and F. Liou, "Determination of constitutive relation from miniature tensile test with digital image correlation," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 55, no. 3-4, pp. 99-108, March 2020. doi: 10.1177/0309324719892732
- [15] S. Dongare, T. E. Sparks, J. Newkirk, and F. Liou, "A mechanical testing methodology for metal additive manufacturing processes," *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014. doi.org/10.26153/tsw/15679
- [16] H. Kyutoku, N. Maeda, H. Sakamoto, H. Nishimura, and K. Yamada, "Effect of surface treatment of cellulose fiber (CF) on durability of PLA/CF bio-composites," *Carbohydrate polymers*, vol. 203, pp. 95-102, Jan. 2019. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.09.033
- [17] Polymersolutions, "3 Types of Plastic Used in 3D Printing." polymersolutions.com, May 31, 2016. [Online]. Available: <https://www.polymersolutions.com/plastic-in-3d-printing/> [Accessed: Jun. 10, 2024].
- [18] eSUN, "Technical Data Sheet of PLA+." esun3d.com, November, 2021 [Online]. Available: [https://www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_PLA+-Filament\\_TDS\\_V4.0.pdf](https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf) [Accessed: Jun. 8, 2024].
- [19] Anycubic. "User Guide for Standard Resin." store.anycubic.com, [Online]. Available: [https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/Anycubic\\_Standard\\_Resin\\_User\\_Manual\\_V1.0-EN\\_1.pdf?v=1663574587&ref=loox-pr](https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/Anycubic_Standard_Resin_User_Manual_V1.0-EN_1.pdf?v=1663574587&ref=loox-pr) [Accessed: Jun. 8, 2024].
- [20] U. Mahir, Yusuf Eren, Erdoğan, "Investigation of the Effect of Using Unreinforced and Reinforced PLA in Production by Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties," *Journal of the Institute of Science and Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 2800-2808, Dec. 2020. doi: 10.21597/jist.799230
- [21] İ. Aktitiz, K. Aydin, and A. Topcu, "The Effect of Post-Curing Time on Mechanical Properties in 3D Polymer Materials Printed by Stereolithography (SLA) Method," *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, vol. 35, no. 4, pp. 949-958, Dec. 2020. doi: 10.21605/cukurovaummfd.868895
- [22] İleri3D. "Anycubic UV Reçine Ürün Özellikleri," ileri3d.com, [Online]. Available: <https://www.ileri3d.com/urun/anycubic-uv-recine-1-kg-sla-dlp-gri-pr> [Accessed: Jun. 9, 2024].
- [23] M. Sharma, V. Sharma, and P. Kala, "Optimization of process variables to improve the mechanical properties of FDM structures," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1240, no. 1: IOP Publishing, p. 012061. doi: 10.1088/1742-6596/1240/1/012061
- [24] A. El Magri, K. El Mabrouk, and S. Vaudreuil, "Preparation and characterization of poly (ether ether ketone)/poly (ether imide) [PEEK/PEI] blends for fused filament fabrication," *Journal of Materials Science*, vol. 56, no. 25, pp. 14348-14367, May. 2021. doi: 10.1007/s10853-021-06172-x
- [25] M. Moradi, R. Hashemi, and M. Kasaean-Naeini, "Experimental investigation of parameters in fused filament fabrication 3D

printing process of ABS plus using response surface methodology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-18, May. 2023. doi: 10.1007/s00170-023-11468-0

[26] R. Muñoz, Á. Hernández, F. Roshardt, J. R. V. Baudrit, and R. Christoph, "Impresion 3d: pruebas de resistencia de materiales de acuerdo a norma ASTM D638-10," *Inst. Ciencias, Tecnol. e Innovación*, Jun. 2015.

[27] M. Rund, J. Volák, and M. Šindelářová, "Small Size Specimens Methods for Evaluation of Mechanical Properties," *Advanced Materials Research*, vol. 1127, pp. 1-8, Oct. 2015. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1127.1

[28] M. Costa, G. Viana, C. Canto, LFM da Silva, M.D. Banea, F. Chaves, R.D.S.G. Campilho and A.A. Fernandes, "Effect of the size reduction on the bulk tensile and double cantilever beam specimens used in cohesive zone models," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 230, no. 5, pp. 968-982, Oct. 2016. doi: 10.1177/1464420715610248

[29] R. Darabi, E. Azinpour, F. K. Fiorentin, M. J. Abarca, J. Cesar de Sa, and J. Dzugan, "Experimental and computational analysis of additively manufactured tensile specimens: assessment of localized-cooling rate and ductile fracture using the Gurson–Tvergaard–Needleman damage model," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 235, no. 6, pp. 1430-1442, Jan. 2021. doi: 10.1177/1464420721990049

[30] S. Kumar, S. Venkatachalam, K. Hariharan, D. R. Kumar, H. Murthy, "Influence of Inhomogeneous Deformation on Tensile Behavior of Sheets Processed through Constrained Groove Pressing", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, vol. 141, no. 4. May. 2019. doi: 10.1115/1.4043492

[31] S. T. Rosinski, A. S. Kumar, S. C. Canon and M.L. Hamilton, "Application of subsize specimens in nuclear plant life extension". *ASTM STP 1204*, United States: pp. 405-416, Oct. 1993.

[32] D. Dobi, E. Junghans, "Determination of the Tensile Properties of Specimens With Small Dimensions" *Kovine Zlitrine Tehnologije*, vol. 33, no. 6. pp. 451-457, 1999. ISSN: 1318-0010

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## The Design Process Model with Deep Learning Support for Unmanned Ground Vehicles

Cüneyd Demir<sup>a</sup>, Cengiz Eldem<sup>b</sup>

Submitted: 03.09.2024 Revised: 08.12.2024 Accepted: 28.12.2024 doi: 10.30855/gmbd.0705AR15

### ABSTRACT

**Keywords:** UGV, Unmanned ground vehicle, Deep learning, Design process model

<sup>a</sup> Kırşehir Ahi Evran University,  
Mucur Vocational School,  
Dept. of Computer Technologies,  
40100 – Kırşehir, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-4628-7786

<sup>b</sup> Gazi University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 – Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-6652-7452

\*Corresponding author:  
cuneyd.demir@ahievran.edu.tr

The study focuses on the challenges associated with the design of unmanned ground vehicles (UGVs), which are among the most critical elements of modern defense technologies. These vehicles are prominent for their high performance in critical military operations and provide tactical superiority for countries in various areas, from ground operations to safe withdrawal at the international level. The study emphasizes the necessity of using modern design techniques instead of traditional methods and, in this context, introduces a new design process model. The model consists of three fundamental stages. The first stage involves defining the problem, detailing the specifications, and identifying the requirements and constraints. The second stage focuses on evaluating alternative proposals and selecting a solution compatible with artificial intelligence. In this stage, the most suitable UGV was identified using deep learning techniques, particularly through a three-layer artificial neural network architecture, achieving successful predictions with a %99.7 accuracy rate. The final stage includes presenting the proposed solution for user feedback and approval. The findings demonstrate that deep learning methods can be effectively used in UGV design, providing strategic advantages with high accuracy rates.

## İnsansız Kara Araçları İçin Derin Öğrenme Destekli Tasarım İşlem Modeli

### ÖZ

Çalışmanın temelinde modern savunma teknolojilerinin en kritik unsurlarından biri olan insansız kara araçlarının (İKA) tasarımına yönelik sorunlar ele alınmıştır. Bu araçlar, kritik askeri operasyonlarda yüksek performans ile ön plana çıkmakta ve uluslararası düzeyde, kara operasyonlarından emniyetli geri çekilmeye kadar birçok alanda ülkeler için taktiksel üstünlük sağlamaktadır. Bu çalışmada, geleneksel tasarım yöntemlerinden ziyade modern tasarım tekniklerinin kullanılması gerektiği vurgulanmış ve bu bağlamda yeni bir tasarım işlem modeli geliştirilmiştir. Tasarım işlem modeli, üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, problemin tanımlanması, şartname bilgilerinin detaylandırılması ve ihtiyaç-kısıtların belirlenmesi sürecini kapsamaktadır. İkinci aşama ise alternatif önerilerin değerlendirilmesi ve yapay zekâ ile uyumlu bir çözümün seçilmesidir. Bu aşamada, derin öğrenme teknikleri kullanılarak en uygun İKA belirlenmiştir. Özellikle üç katmanlı bir yapay sinir ağı mimarisi kullanılmış ve %99,7 doğruluk oranı ile başarılı tahminler elde edilmiştir. Son aşama, kullanıcı geri bildirim ve onayı için çözüm önerisinin sunulmasını içermektedir. Elde edilen bulgular, derin öğrenme yöntemlerinin İKA tasarımında etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve yüksek doğruluk oranları ile stratejik avantajlar sağlanabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** İKA, İnsansız kara araçları, Derin öğrenme, Tasarım işlem modeli

## 1. Giriş (Introduction)

İnsansız kara aracı (İKA), geleceğin ordularında önemli bir rol oynayan otonom sistemlerdir. Bu araçlar, üzerlerinde bulunan elektronik görüş sistemleri, çeşitli sensörler ve uzaktan kumandalı silah sistemleri sayesinde savaş alanındaki riskleri minimize etmek ve herhangi bir tehdidi etkisiz hale getirmek amacıyla tasarlanmıştır. İnsansız kara aracının güncel tanımı, yüksek hareket kabiliyetine sahip ve dayanıklı bir platform üzerinde, göreve özgü çeşitli modüllerin eklenerek uyum sağlayabildiği bir araç olarak yapılabilir. Bu araçlar, ayarlanabilir otonomi düzeyleri ve modüler kontrol konsolları ile uzaktan yönetilebilir, zeminle temas ederek ilerleyen yeni nesil insansız araçlar olarak ifade edilir [1].

Gelişen teknolojiyle insansız kara araçları savunma, tarım, lojistik ve keşif gibi alanlarda önemli bir yer edinmiştir. Kaynak araştırmaları, İKA üzerine yapılan çalışmaların genellikle otonom hareket, engel algılama, yol planlaması, sensör entegrasyonu ve çeşitli endüstriyel uygulamalara odaklandığını göstermektedir. Bununla birlikte, İKA tasarımı üzerine gerçekleştirilen araştırmalarda çoğunlukla geleneksel yöntemlerin kullanıldığı belirlenmiştir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla, modern tasarım metodolojilerini temel alan ve derin öğrenmeyi karar verme aşamasında entegre eden yeni bir tasarım işlem modeli geliştirilmiştir.

Geliştirilen model, askeri İKA tasarımını derin öğrenme ile gerçekleştirme kapasitesine sahip olup, bu araçların doğru seçim ve konfigürasyonunu sağlayarak görev etkinliğini artırmayı hedeflemektedir. Literatürde, modern tasarım metodolojilerini esas alan kapsamlı bir tasarım işlem modelinin eksikliği, karar süreçlerinde derin öğrenmenin kullanılmamış olması ve kullanıcı odaklı bir programın bulunmaması, bu çalışmayı akademik ve özgün açıdan önemli kılmaktadır.

Son yıllarda askeri maksatlı insansız kara araçları ile ilgili yapılan önemli çalışmalar detaylı olarak verilmiştir. Yamauchi (2004), askeri insansız kara aracı olan iRobot PackBot platformuyla gerçekleştirilen kimyasal ve radyasyon algılama için CHARS, İKA ve İHA özelliklerini birleştiren Griffon, yaralı taşıma için Valkyrie ve otonom şehir içi navigasyon geliştiren Wayfarer olmak üzere dört Ar-Ge projesini tanıtmaktadır [2]. Hussain ve arkadaşları (2005), evrimsel hesaplama ve ajan tabanlı teknolojiler kullanarak İKA'ların taktiksel tepkilerini optimize eden ve hızlı lojistik planlama sağlayan bir prototip geliştirmiştir [3]. Trentini ve Beckman (2010), asimetrik çatışmalarda yaya askerlerin farkındalığını artırmak için İKA'ların yük taşıma ve destek, İHA'ların ise gözetim ve hızlı manevra kabiliyetiyle iş birliği yapmasını önermektedir [4].

Arrshith ve arkadaşları (2018), elektromanyetik tabanca ile donatılmış, kompakt ve kamuflej yeteneklerine sahip insansız kara araçlarının, mayın temizleme, lojistik destek ve silah montajı gibi görevlerde askeri birliklere güvenli bir şekilde destek sağladığını ele almıştır [5]. Naranjo ve arkadaşları (2018), manuel kullanım seçeneğini korurken otonom navigasyon ve teleoperasyon yetenekleri kazandıran, askeri hizmet araçlarını insansız kara araçlarına dönüştüren bir otomasyon kiti geliştirmiştir [6]. Nohel ve arkadaşları (2020), Manevra Kontrol Sistemi CZ ile otonom araç gruplarının taktiksel kullanımını ormanlık ve açık arazilerde üç senaryoyla değerlendirerek, askerlerin hayatını koruma ve düşmanı etkisiz hale getirme amaçlarına odaklanmıştır [7].

Chothani ve arkadaşları (2020), tehlikeli çevre ve coğrafi engellere uyum sağlayabilen, uzaktan kontrol edilebilen ve otonom engel kaçınma yeteneğine sahip düşük maliyetli bir insansız kara aracı tasarlamıştır [8]. Ni ve arkadaşları (2021), X-by-wire teknolojisi ve bulut tabanlı kontrol yaklaşımlarının insansız kara araçlarının çevre algılama, hareket planlama ve dinamik kontrol performansını artırmadaki rolünü incelemiştir [9]. Vichore ve arkadaşları (2021), çatışma bölgelerinde insan kaybını azaltmak için, gerçek zamanlı görüntü işleme algoritmalarıyla otonom veya internet üzerinden uzaktan kontrol edilebilen bir insansız kara aracı geliştirmiştir [10]. Hajdu ve arkadaşları (2022), askeri insansız kara araçlarının dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini analiz ederek, duyuşal bileşenlere dayalı bir sistem-özerklik dayanıklılık sınıflandırması ve teorik bir çözüm önerisi sunmuştur [11]. Rashid ve arkadaşları (2022), uzaktan kontrol edilen sürüş ve %45 hedef vurma oranına sahip AK-47 simülasyonu ile donatılmış ateşleme mekanizması sunan bir insansız kara aracı prototipi geliştirmiştir [12]. Krecht ve arkadaşları (2023), askeri insansız kara araçlarının dayanıklılığını süreç grafikleriyle nicel olarak analiz eden bir yöntem sunarak, bu yaklaşımı bir İKA'nın algılama alt sistemi üzerinde uygulamış ve sonuçları değerlendirmiştir [13].

Rahman ve arkadaşları (2023), yüz tanıma için Haar-cascade ve LBPH algoritmalarını kullanan, lazerli

taret sistemiyle asker katılımını azaltarak güvenlik sorunlarını çözmeyi hedefleyen bir insansız kara aracı geliştirmiştir [14]. Wu ve arkadaşları (2023), askeri insansız kara araçlarının otonom yeteneklerini ölçmek için çevresel karmaşıklığı nesnel ve öznel boyutlarıyla değerlendiren entropi tabanlı bir hiyerarşik yöntem önermiştir [15]. Pan ve arkadaşları (2024), düşük irtifa İHA ve İKA görüntü verilerini askeri istihbarata dönüştüren, MOCO veri setiyle üstün performans gösteren MAE-MilitIC adlı görüntü altyazılama mimarisini tanıtmıştır [16].

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Askeri kullanım için geliştirilen bir tasarım programıyla, insansız kara araçlarının görev profilleri belirlenmiştir. Program kapsamında, temel mekanik sistemler tanımlanarak bir tasarım katalogu ve kataloga uygun bir veri tabanı oluşturulmuştur. Kullanıcı seçimleri doğrultusunda, sahada beklenen performans ve özellikler analiz edilmiş ve derin öğrenme karar mekanizması kullanılarak en uygun insansız kara aracı tasarımı gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Tasarım işlem modeli (Design process model)

Geçmişteki sistematik tasarım yöntemleri, modern teknolojilere entegre edilerek güncellenmiş ve karar verme yapılarıyla daha gelişmiş teknikler sunmuştur. Ancak, insansız kara araçları için derin öğrenme tabanlı tasarım işlem modellerinde bu yöntemlerin sınırlı kaldığı ve tek başına yeterli olmadığı görülmektedir. Her bir teknik, bilgi temsili, organizasyonu, karar yapısı ve alternatif çözüm üretme yöntemleri açısından kendine özgü özellikler barındırır da karmaşık tasarım süreçlerinde kapsamlı bir çözüm sunmada yetersiz kalmaktadır.

İnsansız kara araçları için, geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli, maliyet ve zaman açısından avantajlı, düşük hata oranına sahip modern tasarım tekniklerine geçiş hedeflenmiştir. Bu bağlamda, fonksiyonel tasarımı ifade edebilen, veri tabanını etkin kullanan, yapay zeka ile alternatif çözümleri değerlendiren ve geri bildirim sağlayabilen bir sistematik tasarım tekniği geliştirilmiştir. Bu yeni model, tasarım süreçlerini kolaylaştırarak daha etkili, uyarlanabilir ve yenilikçi çözümler sunmaktadır.

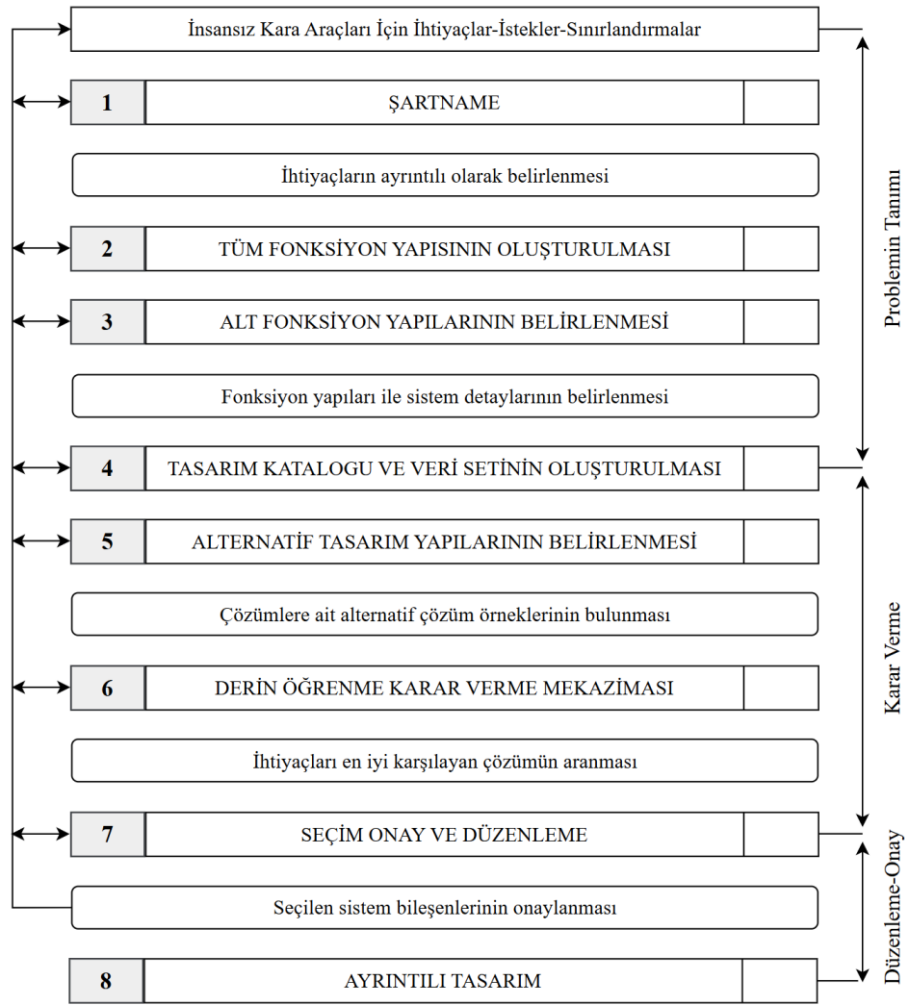
Geliştirilen tasarım işlem modeli üç ana aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1):

- Problemin tanımı aşaması, insansız kara araçları için tasarım şartnamesi hazırlayarak fonksiyon yapılarını belirleyip alt fonksiyonlara ayırmak suretiyle, enerji, malzeme ve sinyal gibi girdilerle sistemin çıktıları arasındaki ilişkileri netleştiren ve katalog çözümlerine uyumlu bir yaklaşım sunan bir süreçtir.
- Karar verme aşaması, insansız kara araçları için fonksiyon yapıları ve ihtiyaç ilişkileri üzerinden derin öğrenme destekli karar verme teknikleriyle alt sistem elemanlarının seçimini hızlandıran, maliyetleri düşüren ve alternatif çözümler sunan bir değerlendirme sürecidir.
- Düzenleme ve onay aşaması, insansız kara aracının alt sistemlerinin, katalog esas alınarak en uygun yapıların seçimiyle belirlenip ayrıntılı tasarım öncesinde tamamlandığı süreci ifade eder.

Bu çalışmada öncelikle insansız kara aracı ile ilgili kompleks olan problemin tespiti yapılmıştır. Bu karmaşık problem, kötü hava koşullarına uyum sağlayabilen, yumuşak ve engebeli zeminler üzerinde etkili bir şekilde hareket edebilen, çeşitli intikal konfigürasyonlarına uygun hareket yeteneğine sahip, hem uzaktan kontrol edilebilen hem de otonom operasyonlara uygun şekilde donatılmış, uzun görev sürelerini destekleyen, yüksek manevra kabiliyetine sahip, görev amaçlarına uygun faydalı yükler taşıyabilme kapasitesine sahip, yüksek enerji verimliliği ve iyi yol tutuş özelliklerine sahip, geniş kapsama alanı sunan, istenilen hız ve ivmelenme seviyelerine ulaşabilen, yüksek stabilite özellikleriyle ve tasarım aşamasında belirlenen genel ve özel şartlara uygun dayanıklılık, güvenlik ve fonksiyonellik açısından optimize edilmiş bir insansız kara aracının tasarımıdır.

Karar verme yapısı olan derin öğrenmenin uygun alternatifleri oluşturulabilmesi için, şartname aşamasında tasarımcıdan ya da müşteriden bazı cevaplar istenmektedir. Tasarımcı ya da müşteriden karar verme sistemi için insansız kara aracının maliyeti, boyutsal sınıflandırması, özerklik seviyesi, kapsama alanı, yerine getireceği görevler, kullanılacak motor tipi, görev yapacağı arazi tipi, manevra kabiliyeti durumlarına dair cevaplar istenmektedir.

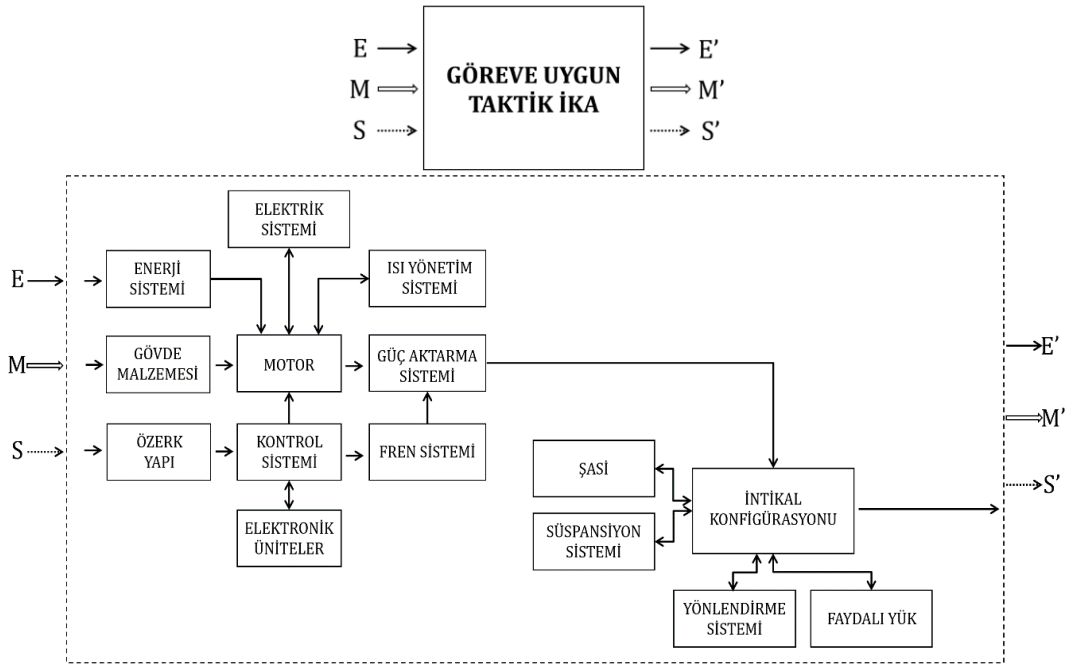




Şekil 1. Tasarım işlem modeli  
(Design process model)

Tasarlanan sistem yapısı, enerji, malzeme ve sinyal bileşenlerini giriş ve çıkış olarak ele alarak, insansız kara aracının çalışma prensibini yüksek düzeyde temsil eder. Fonksiyon yapısı, sistemin girdileri (E, M, S) ve çıktıları (E', M', S') ile alt sistemlere ayrılmıştır. Şekil 2, genel fonksiyon yapısını ve alt sistemlerin ilişkilerini ve bağlantılarını açıklayan bir blok diyagramdır. Bu yapı, insansız kara aracının farklı bileşenlerinin nasıl bir bütün olarak işlediğini göstermektedir.

Şekil 2'de insansız kara aracının enerji, mekanik ve elektronik sistemleri arasındaki etkileşimler açıkça gösterilmiştir. Enerji sistemi, motora güç sağlar ve bu motor, sistemin merkezi bileşeni olarak görev yapar. Motor, elektrik sistemi, ısı yönetim sistemi, güç aktarma sistemi ve kontrol sistemi ile bağlantılıdır. Güç aktarma sistemi, motor tarafından üretilen gücü diğer parçalara aktarır. Kontrol sistemi ise motorun, elektronik ünitelerin ve özerk yapıların operasyonlarını yönetir. Bu kontrol sistemi, aynı zamanda fren sistemi ile de ilişkilidir. Aracın yapısal bileşenleri arasında gövde malzemesi ve şasi bulunmaktadır. Şasi, aracın iskeletini oluşturur ve intikal konfigürasyonu ile bağlantılıdır. Süspansiyon sistemi, intikal konfigürasyonu ile çalışarak aracın sürüş ve yol tutuş özelliklerini yönetir. İntikal konfigürasyonu, şasi, süspansiyon sistemi, yönlendirme sistemi ve faydalı yük ile etkileşim içerisindedir. Yönlendirme sistemi, aracın yön kontrolünü sağlar. Faydalı yük ise aracın görevine yönelik sistemleri üzerine alır. İnsansız kara aracı, birbirleriyle etkileşimde olan bütün sistemlerin entegre bir şekilde sağlıklı olarak çalışması ile harekete geçer.



Şekil 2. Tüm ve alt fonksiyon yapısı  
(Overall and sub-functions structure)

Kavramsal tasarım süreci, sistem yapılarının ve ilişkilerinin belirlenmesiyle başlar. Alt sistemlere uygun tüm mekanik yapıların bilinmesi, alternatif çözümler geliştirilmesini sağlar. Bu çözümler, çeşitli değerlendirme yöntemleriyle analiz edilerek en uygun seçenekler belirlenir. Kavramsal tasarımda uygun çözümün sembolik bir temsili yeterlidir. Boyutlandırma, mukavemet hesapları ve detaylı şekillendirme gibi işlemler mühendislik aşamasında gerçekleştirilir.

İnsansız kara aracı tasarımına etkiyecek nedenlerin başında, insansız kara aracının kullanım amacının ve intikal konfigürasyonunun belirlenmesi gelir. Özerk yapısının ve kontrol yönteminin belirlenmesi, üzerine alacağı faydalı yük ile görevinin tespiti, motor türü ve buna göre enerji sisteminin saptanması, güç aktarma, fren, ısı yönetim ve elektrik sistemlerinin belirlenmesi, çalışacağı arazi tipine göre süspansiyon sisteminin seçimi, manevra kabiliyetine göre yönlendirme sisteminin belirlenmesi, ortalama ağırlığının kaç kilogram aralığında olacağını saptanması, dayanıklılığının belirlenmesi vb. bütün seçimler insansız kara aracının kullanım amacına ve intikal konfigürasyonuna bağlı olarak belirlenecek alt sistemlerdir.

Tasarım işlem modelinde, alternatif tasarımların üretilmesi, düzenlenmesi ve fonksiyonel yapılar üzerinde değişikliklerin yapılması için, olabildiğince geniş bir çözüm yelpazesi sunabilen tasarım katalogları kullanılmıştır. İnsansız kara araçlarının genel tasarımında, birbirleriyle karmaşık ilişkiler içinde olan çok sayıda alt sistem bulunmaktadır (Tablo 1).

Tasarım gereksinimleri, alt sistemler arasındaki ilişkiler dikkate alınarak analiz edilmiş ve en uygun çözümün belirlenebilmesi için kapsamlı bir veri seti hazırlanmıştır. Bu veri seti, tasarım katalogundan alınan özerk yapı, kontrol sistemi, faydalı yük, gövde malzemesi, motor, enerji sistemi, güç aktarım sistemi, fren sistemi, ısı yönetim sistemi, elektrik sistemi, yönlendirme sistemi, süspansiyon sistemi, intikal konfigürasyonu, şasi ve elektronik ünitelerden oluşan 15 ana parametreyi kapsamaktadır.

Tasarım katalogu üzerinden oluşturulan çözüm uzayında toplamda 907 milyon 200 bin çalışan ve çalışmayan sistem bulunmaktadır. Ancak, hazırlanan veri seti, 15 ana parametre için doğrulanmış ve uygulanabilir yaklaşık 15 bin çalışan sistemden oluşmaktadır. Bu sistemler, tasarım katalogunda yer alan farklı özellik ve yapıdaki alternatifleri kapsamaktadır. Veri setinin kalitesi, yalnızca doğrulanmış ve pratikte uygulanabilir yapıların seçilmesiyle sağlanmıştır.

Verilerin güvenilirliği, bir insansız kara aracının çalışma prensiplerine uygun şekilde parametreler ve bu parametre çeşitleri üzerinde yapılan kapsamlı literatür taramaları ile desteklenmiştir. Veri artırma sürecinde mevcut parametre kombinasyonlarının türevleri alınarak veri çeşitliliği artırılmış, ayrıca tasarım kataloguna eklenebilecek yeni parametreler veri artırma işlemi desteklemiştir.

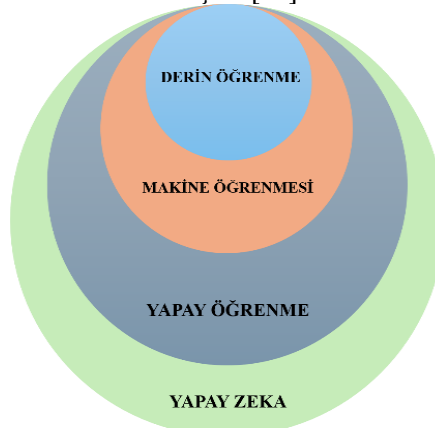
Tablo 1. İKA tasarım kataloğu  
(UGV design catalog)

TASARIM KATALOGU											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Özerk Yapı	Manuel	Yarı-Otonom	Otonom							
2	Kontrol Sistemi	RF Kumanda	Uzaktan Kumanda Modülü	Uydu							
3	Faydalı Yük	Gözetleme Sistemi	Bomba İmha Sistemi	Taşıyıcı Sistem	Silah Sistemi	Mayın-Engel Temizleme Sistemi					
4	Motor	0-20 kw	20-75 kw	75-300 kw	300+ kw	25-100 Hp	100-400 Hp	400+ Hp	25-100 Hp + 0-20kw	100-400 Hp + 20-75 kw	400+ Hp + 75+ kw
5	Yönlendirme Sistemi	Ackerman	Diferansiyel	4WS	Skid-Steer	Aktif Dönüşlü					
6	Süspansiyon Sistemi	Kauçuk-Elastomerik	Yay ve Amortisör Sistemleri	MacPherson	Çift Salıncaklı	Burulabilen Mil	Katı Aks	Hidropnömatik			
7	Gövde Malzemesi	Polimer Malzemeler	Kompozit Malzemeler	Alüminyum Alaşımlar	Çelik Alaşımlar						
8	Enerji Sistemi	Pil	Batarya	Yakıt Hücresi	Yakıt Tankı						
9	Güç Aktarma Sistemi	Sabit Oranlı Transmisyon	Elektrikli Transmisyon	Değişken Oranlı Transmisyon							
10	Fren Sistemi	Dinamik Frenleme	EBS	ABS	Rejeneratif Frenleme						
11	Isı Yönetim Sistemi	Hava Soğutmalı	Yağ Soğutmalı	Su Soğutmalı							
12	Elektrik Sistemi	Akisüz	12V-Akü	24V-Akü	28V-Akü						
13	Elektronik Üniteler	Sensörler-Kameralar-İşlemciler-Güç Dağıtım Üniteleri-Kablolar									
14	İntikal Konfigürasyonu	2 Tekerlekli	4 Tekerlekli	6 Tekerlekli	8 Tekerlekli	Paletli					
15	Şasi	2 Tekerlekli Şasi	4 Tekerlekli Şasi	6 Tekerlekli Şasi	8 Tekerlekli Şasi	Paletli Şasi					

## 2.2. Derin öğrenme (Deep learning)

Yapay zeka, teoriden pratiğe geçerek problemlerin çözümü için algoritmalar geliştirilmesine ve ürün ile hizmetlerde etkin kullanımına olanak sağlamıştır [17]. Yapay zeka, insan davranışlarını taklit eden robotlar ve konuşma, anlama, görme gibi insan zekası işlevlerini gerçekleştiren programlar geliştirmeyi hedefler. Temel amacı, akıllı makineler oluşturup zekanın özünü keşfetmektir [18]. Yapay öğrenme, makinelerin görevleri yerine getirme ve sorunları otomatik çözüme yeteneklerini geliştirmeyi amaçlar. Yapay zeka ve alt kategorilerinin hiyerarşik yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir [19].

Makine öğrenimi, verileri analiz ederek öngörü ve modelleme yeteneği kazandıran algoritmalar geliştiren yapay zeka disiplini [20]. Makine öğrenimi, matematiksel modeller ve ayarlanabilir parametreler kullanarak verileri analiz eder, tahminler yapar ve yeni içgörüler sağlar. Verilerin işlenmesi, öznetelik çıkarımı ve normalizasyon süreçlerinden geçtikten sonra, sınıflandırma algoritmaları ile analiz gerçekleştirilir [21]. Yapay sinir ağlarındaki katmanlı yapı ile alt seviyeden üst seviyeye veri soyutlamaları öğrenir. Geri yayılım algoritmasıyla parametreler ayarlanarak, büyük veri setlerindeki karmaşık yapılar modellenir ve anlaşılır [22].



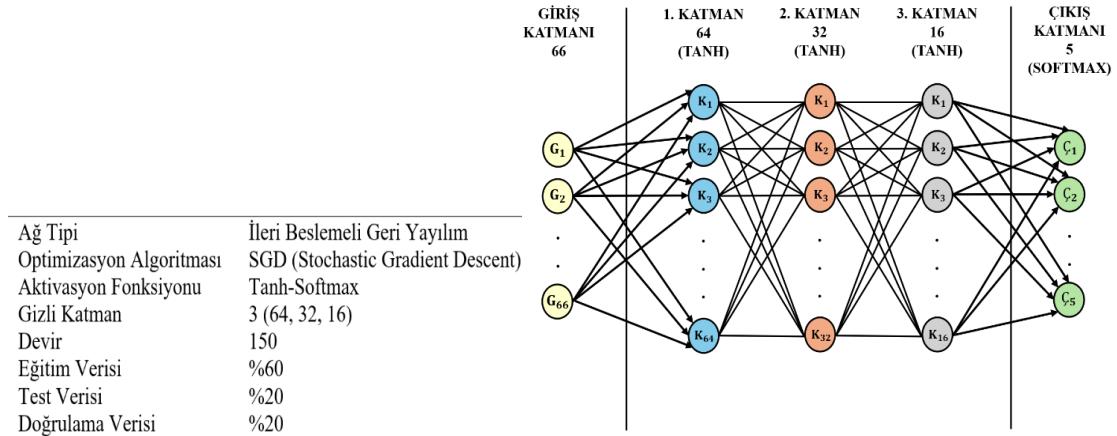
Şekil 3. Yapay zeka ve alt dalları [28]  
(Artificial Intelligence and Its Subfields)

Derin öğrenme, katmanlar arası hiyerarşik yapısıyla otomatik özellik çıkarımı yapabilen, çoklu

işlemleri eş zamanlı gerçekleştiren bir yöntemdir [23]. Derin öğrenme modelleri, doğrudan veriden öğrenerek geniş veri seti ihtiyacını azaltır. Yüksek boyutlu verilerde karmaşık yapıları çözmeye yeteneğiyle konuşma, görme, doğal dil işleme, konuşma tanıma, bilgisayarlı görü ve çoklu görev öğrenimi gibi geniş bir uygulama alanı sunar [24]. Geçmişte derin öğrenme, veri işleme kapasitelerinin yetersizliği nedeniyle yaygın değildi. Günümüzde ise yeterli veri ve gelişmiş altyapılar sayesinde geniş çapta kullanılabilir hale gelmiştir [25]. Derin öğrenme, yapay sinir ağları ve çok katmanlı modellerle veri ayrıştırması yapar ve görsel tanıma, konuşma algılama, nesne tespiti, ilaç geliştirme ve genom analizi gibi alanlarda hızla ilerlemektedir [26]. Derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir dalı ve yapay zekanın temel bileşenlerinden biridir. Büyük verilerden anlam çıkararak sonuçlar üreten bu yöntem, özellikle görüntü işleme ve nesne tanıma gibi alanlarda önemli bir yer tutmaktadır [27]. Derin öğrenme, makine öğrenmesinin en çarpıcı ve önemli uygulamalarını gerçekleştirmeyi sağlamıştır.

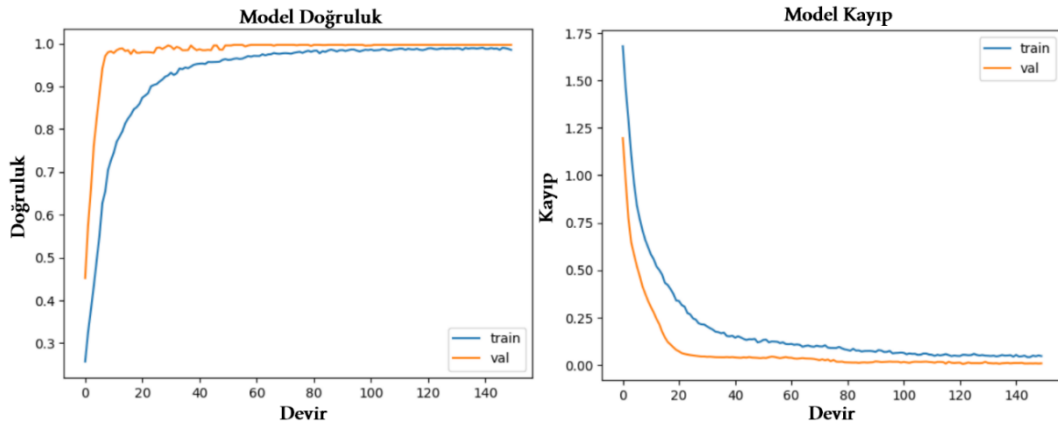
### 2.3. Yapay sinir ağları modeli (The artificial neural network model)

Yapay sinir ağları, insan beyninden esinlenerek geliştirilen ve karmaşık veri ilişkilerini öğrenebilen güçlü bir sınıflandırma algoritmasıdır. Geliştirilen tasarım işlem modelinin derin öğrenme ile karar verme aşamasında kullanılmak üzere bir YSA modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen YSA modeli, ileri beslemeli geri yayılım mimarisine tasarlanmış, kayıp fonksiyonunu minimize etmek için SGD optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonları olarak Tanh ve Softmax seçilmiş, modelde sırasıyla 64, 32 ve 16 nöronlu üç gizli katman bulunmaktadır. Model, 150 devir boyunca eğitilmiş ve veri kümesi %60 eğitim, %20 test, %20 doğrulama olarak bölünmüştür. Detaylar Şekil 4'te sunulmuştur.



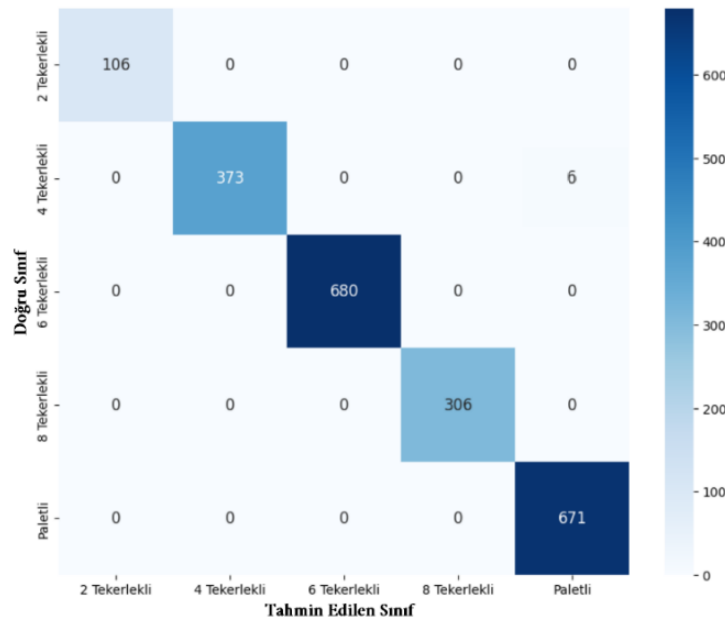
Şekil 4. Model mimarisi  
(Model architecture)

Modelin doğrulama verisinde kısa sürede yüksek doğruluk seviyesine ulaşip bunu koruması, eğitimin etkili olduğunu göstermektedir. Eğitim verisi üzerindeki kayıp değerinin düzenli olarak azalması, başarılı bir öğrenme sürecine işaret etmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, model hem eğitim hem de doğrulama verilerinde performansını optimize etmiş, doğrulama kaybı başlangıçta hızla düşüp sabit bir seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, modelin istikrarlı bir performans sergilediğini ve aşırı öğrenme belirtilerinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 5. Model doğruluk ve kayıp grafikleri  
(Model accuracy and loss graphics)

Modelin sınıflandırma performansı Şekil 6'da bulunan karışıklık matrisi grafiği üzerinde gösterilmektedir. Modelin neredeyse bütün sınıfları için doğru sınıflandırma mevcut iken 6 adet 4 tekerlekli insansız kara aracı paletli olarak yanlış bir şekilde sınıflandırılmıştır.



Şekil 6. Karışıklık matrisi  
(Confusion matrix)

Tablo 2'de, 3 gizli katman ve 64, 32, 16 nöron sayısı ile oluşturulan modellerde, Adagrad, Adam, Lion, Nadam, RMSprop ve SGD optimizasyon algoritmaları farklı aktivasyon fonksiyonları (relu, sigmoid, tanh) ile denenmiştir. Modellerin performansı, Anaconda Jupyter Notebook ortamında elde edilen karışıklık matrisleri kullanılarak değerlendirilmiş ve doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru gibi metriklerle karşılaştırılmıştır. Bu analizler, deneme yanılma yöntemiyle en iyi modelin belirlenmesine yöneliktir ve sonuçlar tabloda detaylı olarak sunulmuştur.



Tablo 2. Deneme-yanılma yöntemi ile performans metrikleri raporu  
(Performance metrics report using trial and error method)

3 katmanlı (64, 32, 16) nöron sayılı	Optimizasyon Algoritmaları	Aktivasyon Fonksiyonu	Doğruluk	Sınıflar	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Ölçütü
	3 katmanlı (64, 32, 16) nöron sayılı	Adagrad	Tanh	0.944	2 Tekerlekli	0.67	0.65
4 Tekerlekli					0.97	0.90	0.93
6 Tekerlekli					0.99	0.96	0.97
8 Tekerlekli					0.88	1.00	0.93
Paletli					0.99	1.00	0.99
Adam		Sigmoid	0.969	2 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
				4 Tekerlekli	1.00	0.93	0.96
				6 Tekerlekli	0.89	0.99	0.94
				8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
				Paletli	0.99	1.00	0.99
		Tanh	0.974	2 Tekerlekli	0.85	1.00	0.92
				4 Tekerlekli	1.00	0.99	1.00
				6 Tekerlekli	0.90	1.00	0.95
				8 Tekerlekli	1.00	0.93	0.96
				Paletli	1.00	1.00	1.00
Lion		Tanh	0.963	2 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
				4 Tekerlekli	1.00	0.98	0.99
				6 Tekerlekli	0.93	1.00	0.96
				8 Tekerlekli	1.00	0.90	0.95
				Paletli	0.99	1.00	1.00
SGD	Tanh	0.997	2 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			4 Tekerlekli	1.00	0.98	0.99	
			6 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			Paletli	0.99	1.00	0.99	
Nadam	ReLU	0.975	2 Tekerlekli	0.92	0.98	0.95	
			4 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			6 Tekerlekli	0.90	1.00	0.95	
			8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			Paletli	1.00	0.85	0.92	
	Sigmoid	0.965	2 Tekerlekli	1.00	0.98	0.99	
			4 Tekerlekli	1.00	0.99	1.00	
			6 Tekerlekli	0.94	1.00	0.97	
			8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			Paletli	0.99	1.00	1.00	
	Tanh	0.943	2 Tekerlekli	0.75	0.70	0.72	
			4 Tekerlekli	0.86	0.90	0.88	
			6 Tekerlekli	0.99	0.96	0.97	
			8 Tekerlekli	0.88	1.00	0.93	
			Paletli	1.00	0.99	0.99	
RMSprop	Sigmoid	0.937	2 Tekerlekli	1.00	0.56	0.72	
			4 Tekerlekli	1.00	0.97	0.99	
			6 Tekerlekli	0.92	1.00	0.96	
			8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00	
			Paletli	0.99	1.00	0.99	
	Tanh	0.967	2 Tekerlekli	1.00	0.99	1.00	
			4 Tekerlekli	0.84	0.93	0.88	
			6 Tekerlekli	1.00	0.94	0.97	
			8 Tekerlekli	0.97	1.00	0.99	
			Paletli	0.99	1.00	1.00	

#### 2.4. Makine öğrenmesi modelleri ile karşılaştırma (Comparison with machine learning models)

Tablo 3'te, Rastgele orman, K-NN ve YSA olmak üzere üç farklı makine öğrenimi sınıflandırma algoritmasının performansları karşılaştırılmıştır. Genel doğruluk oranlarına göre YSA (%99,7) en iyi performansı sergilerken, Rastgele Orman (%98,7) ve K-NN (%98,0) nispeten daha düşük doğruluk değerleri sunmuştur. Kesinlik, duyarlılık ve F1 skorları açısından da YSA tüm sınıflarda en yüksek değerlere ulaşmıştır. Rastgele orman algoritması bazı sınıflarda güçlü performans göstermiş olsa da özellikle tekerlekli araç sınıfında düşük duyarlılık ve kesinlik oranları ile dikkat çekmiştir. K-NN algoritması genel olarak dengeli bir performans göstermiş, ancak YSA'nın sağladığı yüksek doğruluk seviyesine erişememiştir. Sonuç olarak, YSA hem genel doğruluk hem de diğer sınıflandırma metriklerinde üstün performansı ile, tasarım işlem modeli karar verme mekanizmasında İKA intikal konfigürasyonu tespiti için en uygun algoritma olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 3. Makine öğrenmesi algoritmaları ile performans metrikleri karşılaştırması  
(Comparison of performance metrics with machine learning algorithms)

Algoritma	Doğruluk	Sınıf	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Ölçütü
Rastgele Orman	0.987	2 Tekerlekli	0.917	0.943	0.930
		4 Tekerlekli	0.956	0.982	0.969
		6 Tekerlekli	0.997	0.984	0.990
		8 Tekerlekli	1.000	1.000	1.000
		Paletli	1.000	0.994	0.997
K-NN	0.980	2 Tekerlekli	0.835	1.000	0.910
		4 Tekerlekli	0.964	0.982	0.973
		6 Tekerlekli	0.996	0.984	0.990
		8 Tekerlekli	0.998	0.990	0.994
		Paletli	0.995	0.995	0.995
Yapay Sinir Ağları	0.997	2 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
		4 Tekerlekli	1.00	0.98	0.99
		6 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
		8 Tekerlekli	1.00	1.00	1.00
		Paletli	0.99	1.00	0.99

### 2.5. Örnek uygulama (Sample application)

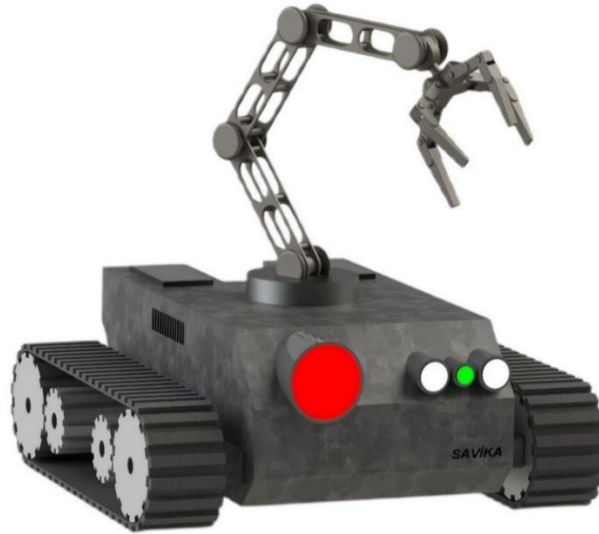
- İnsansız kara aracının maliyeti ne kadar olmalıdır?  
 0-30000 \$     30000-100000 \$     100000+ \$
- İnsansız kara aracının boyutsal sınıflandırması nasıl olmalıdır?  
 Hafif     Küçük     Orta     Ağır
- İnsansız kara aracının özerklik seviyesi ne olmalıdır?  
 1. Seviye     2. Seviye     3. Seviye
- İnsansız kara aracının kapsama alanı ne kadar olmalıdır?  
  $x < 2 \text{ km}^2$       $x < 5 \text{ km}^2$       $x \text{ km}^2$
- İnsansız kara aracının hangi görevleri yerine getirmesi beklenmektedir?  
 Keşif, Gözetleme ve İstihbarat     Bomba İmha     Lojistik  
 Saldırı ve Geri Emniyet     Mayın ve Engel Temizleme
- İnsansız kara aracında hangi tip motor kullanılmalıdır?  
 0-20 kw - Elektrikli     20-75 kw - Elektrikli     75-300 kw - Elektrikli  
 300+ kw - Elektrikli     25-100 Hp - Dizel     100-400 Hp - Dizel  
 400+ Hp - Dizel     25-100 Hp + 0-20kw - Hibrit     100-400 Hp + 20-75 kw - Hibrit  
 400+ Hp + 75+ kw - Hibrit
- İnsansız kara aracı hangi arazi tiplerinde kullanılacaktır?  
 Düz Sert Zemin     Düz Yumuşak Zemin  
 Engebeli Sert Zemin     Engebeli Yumuşak Zemin
- İnsansız kara aracının manevra kabiliyeti ne düzeyde olmalıdır?  
 Geniş Dönüş Yarıçapı     Orta Dönüş Yarıçapı     Dar Dönüş Yarıçapı

Tablo 4'te tasarım işlem modelinin çıkarım mekanizması sayesinde şartname sorularına verilen cevaplar ışığında veri setinden gelen bilgiler ile çoğu parametrenin tespiti sağlanmaktadır. Bütün bu bilgiler ışığında insansız kara aracının harekete geçmesi için gerekli olan en kritik parametresi intikal konfigürasyonu şartname süzgecinden geçirilerek ortaya çıkarılması işlemi tasarım işlem modelinin derin öğrenme karar verme mekanizması ile sağlanmaktadır. Ayrıntılı tasarım aşaması öncesi gerçekleştirilen tasarım işlem modeli son aşaması olan kavramsal tasarım ile ortaya çıkarılan en iyi alternatifin sembolik tasarımı Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 4. Karar verme aşaması sonrası sonuçlar  
(Results after the decision-making phase)

	Tasarım Katalogu Parametreleri	Parametre Çeşitleri	
1	Özerk Yapı	Manuel	
2	Kontrol Sistemi	RF Kumanda	
3	Faydalı Yük	Bomba İmha	
4	Motor	20-75 kw – Elektrikli	
5	Yönlendirme Sistemi	Skid-Steer Yönlendirme Sistemi	
6	Süspansiyon Sistemi	Yay ve Amortisör Sistemi	
7	Gövde Malzemesi	Kompozit Malzemeler	
8	Enerji Sistemi	Batarya	
9	Güç Aktarma Sistemi	Elektrikli Transmisyon	
10	Fren Sistemi	EBS (Elektronik Fren Sistemi)	
11	Isı Yönetim Sistemi	Su Soğutmalı	
12	Elektrik Sistemi	12V-Akü	
13	Elektronik Üniteler	Sensörler/Kameralar/İşlemciler/Güç Üniteleri/Kablolar	Dağıtım
14	İntikal Konfigürasyonu	Paletli	
15	Şasi	Paletli Şasi	

İnsansız kara aracı tasarımını etkileyen en önemli faktörlerden biri, aracın kullanım amacının ve intikal konfigürasyonunun belirlenmesidir. Aracın özerk yapısının ve kontrol yönteminin tanımlanması, taşıyacağı faydalı yük ile görevinin tespiti, motor türü ve buna bağlı olarak enerji sisteminin belirlenmesi, güç aktarma, fren, ısı yönetimi ve elektrik sistemlerinin seçimi, çalışacağı arazi tipine göre süspansiyon sisteminin belirlenmesi, manevra kabiliyetine uygun yönlendirme sisteminin seçimi, ortalama ağırlığının ne kadar olacağını saptanması, dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi gibi tüm bu seçimler, aracın kullanım amacı ve intikal konfigürasyonuna göre şekillenecek alt sistemlerdir.



Şekil 8. En iyi çözümün sembolik tasarımı  
(The symbolic design of the optimal solution)

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

İnsansız kara araçları tasarımı, çok sayıda alt sistem ve bu sistemler arasındaki karmaşık ilişkileri içeren bir süreçtir. En uygun tasarım çözümüne ulaşmak için müşteri gereksinimleri, sistem ilişkileri bağlamında değerlendirilerek bilgisayar destekli tasarım modeliyle alternatif çözümler üretilmeli ve değerlendirilmelidir. Bu modelin kullanımı, tasarım süresi, kalite ve maliyet konularında olumlu etkiler sağlamaktadır. Kullanıcı ihtiyaçlarına uygun sistematik bir tasarım uygulanması, maliyetleri düşürürken, sürecin yanlış yönetilmesi geri dönüşü olmayan ya da maliyetli sonuçlara yol açabilmektedir.

Fiziksel sistemlerin alt fonksiyonlarına yönelik kararlar, bilgisayar destekli karar verme sistemleriyle alınabilmektedir. Bu süreçte, tasarım işlem modelinin sistematik tasarımda etkin kullanımını desteklemek amacıyla tasarım katalogları hazırlanmaktadır. İnsansız kara araçlarına yönelik alternatif çözümler sunan tasarım katalogları ve bu katalogların genel özelliklerini içeren tasarım veri tabanları,

bilgisayar destekli karar verme sürecinin temelini oluşturmaktadır. Bu veri tabanlarının etkin kullanımı, insansız kara aracının tüm fonksiyon ve alt fonksiyonlarının yapısal ilişkilerinin net bir şekilde belirlenmesine ve tasarım sürecinde komponent seçim sırasının kontrol edilebilirliğine bağlıdır.

Bu çalışma, insansız kara araçlarındaki tüm parametrelerin birbiriyle ilişkili olduğunu ve her türlü arazi koşulunda çalışabilecek bir intikal konfigürasyonu oluşturmanın zorluğunu ortaya koymuştur. Geleneksel tasarım sürecinde, insansız kara araçlarının tasarımına genellikle intikal konfigürasyonu seçimiyle başlanmaktadır. Bu çalışmada, derin öğrenme kullanılarak yenilikçi bir tasarım işlem modeli geliştirilmiştir. Derin öğrenme, çok boyutlu verileri işleme ve öğrenme yetenekleri sayesinde, insansız kara aracı seçiminde oldukça doğru kararlar verebilmektedir. Belirlenen sekiz soru çerçevesinde alınan geri bildirimlere dayalı olarak, tasarım katalogu ve sistem, en iyi alternatifleri hızlı ve etkili bir şekilde belirlemiştir.

Bu sonuçlar, derin öğrenme tabanlı karar destek sistemlerinin savunma sanayi ve diğer kritik sektörlerdeki potansiyel uygulama alanlarını genişlettiğini göstermektedir. İnsansız kara aracı tasarım süreci, benzer yöntemlerin diğer insansız sistemlere de uygulanabileceğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen tasarım işlem modelinin esnek ve uyarlanabilir yapısı, farklı koşullara ve gereksinimlere hızla uyum sağlayabilme potansiyelini kanıtlamaktadır.

Derin öğrenme tabanlı bu modelin, savunma sanayisinin yanı sıra sivil maksatlı olarak tarım, madencilik ve lojistik gibi insansız kara araçlarının kullanılabilirliği diğer sektörlerde de uyarlanabilirliği incelenebilir. Bu sektörlerdeki farklı görev tanımları için yeni tasarım kriterleri oluşturulabilir. Gelecek çalışmalarda, tasarım kataloglarının yapay zeka ve optimizasyon algoritmaları ile birleştirilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, tasarım sürecinde kullanıcıya daha fazla esneklik sağlayarak daha hızlı karar verme imkanı sunabilir. Tasarım kataloglarının dinamik hale getirilmesi, kullanıcı gereksinimlerine göre otomatik öneriler sunabilen bir yapı oluşturulmasıyla mümkün olabilir ve bu hem tasarım sürecini hızlandıracak hem de daha verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Yapay sinir ağları modeli, %99,7 doğruluk oranı, kesinlik, doğruluk ve F1 ölçütü açısından en iyi performansı göstermiştir ve bu modelle 6 adet 4 tekerlekli insansız kara aracı paletli olarak yanlış sınıflandırılmıştır. Ancak, karışıklık matrisine dayalı yanlış sınıflandırma analizinde temel nedenlerin veri setindeki parametreler arasındaki karmaşık ilişkiler, bazı sınıflar arasında örtüşme ve belirli alt sistemlerin tasarım özelliklerinin benzerliği olarak belirlenmiştir. Bu sorunların çözümü için veri setinin temelini oluşturan tasarım katalogunun geliştirilmesi önerilmektedir. Tasarım katalogunun genişletilmesi ve detaylandırılmasıyla sınıflar arası farklılıkların netleştirilmesi sağlanarak yanlış sınıflandırmaların azaltılabileceği düşünülmektedir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] C. Demir and M. Bozdemir "İnsansız kara aracı tasarımında ağırlık oranı metodu kullanımı," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 5, no 1, pp. 32-45, April 2019. doi: 10.30855/gmbd.2019.01.04
- [2] B. M. Yamauchi, "PackBot: a versatile platform for military robotics," *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Unmanned Ground Vehicle Technology VI, Florida, USA, 12-16 April 2004*, vol. 5422, G. R. Gerhart, C. M. Shoemaker, D. W. Gage, Eds. USA: SPIE Digital Library, pp. 228-237. doi: 10.1117/12.538328
- [3] T. S. Hussain, D. Cerys, D. Montana, G. Vidaver and J. E. Berliner, "Tactical UGV navigation and logistics planning," *In Proceedings of the 7th annual workshop on Genetic and evolutionary computation, 25-26 June 2005*, F. Rothlauf, Eds. USA: Association for Computing Machinery, pp. 184-186. doi: 10.1145/1102256.1102300
- [4] M. Trentini and B. Beckman, "Semi-autonomous UAV/UGV for dismounted urban operations," *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, In Unmanned Systems Technology XII, Florida, USA, 5-9 April 2010*, vol. 7692, G. R. Gerhart, C. M. Shoemaker, D. W. Gage, Eds. USA: SPIE Digital Library, pp. 436-444. doi: 10.1117/12.852704
- [5] R. G. Arrshith, K. S. Suhas, C. Tejas and G. Subramaniam, "Unmanned ground vehicle (UGV) – Defense bot," *The 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India, 19-20 January 2018*, pp. 1201-1205. doi:10.1109/ICISC.2018.8398995
- [6] J. E. Naranjo, F. Jimenez, M. Anguita and J. L. Rivera, "Automation kit for dual-mode military unmanned ground vehicle for surveillance missions," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 12, no. 4, pp. 125-137, November 2018.

doi:10.1109/MITS.2018.2880274

[7] J. Nohel, P. Stodola and Z. Flasar, "Combat UGV support of company task force operations," *In International Conference on Modelling and Simulation for Autonomous Systems, Prague, Czech Republic, 21 October 2020*, J. Mazal, A. Fagiolini, P. Vasik, M. Turi, Eds. Czech Republic: MESAS, pp. 29-42. doi:10.1007/978-3-030-70740-8\_3

[8] A. Chothani, A. Desai, H. Kaleand and P. Gupta, "Prototype Design of A UGV for Military Purpose," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 7, pp 3175-3178, July 2020.

[9] J. Ni, J. Hu and C. Xiang, "A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 235, no. 4, pp. 1084-1100, April 2020. doi:10.1177/0954407020912097

[10] H. Vichore, J. Gurumurthi, A. Nair, M. Choudhary and L. Ladge, "Self-driven UGV for military requirements," *In Innovations in Computer Science and Engineering: Proceedings of 8th ICICSE, Singapore, 24 April 2021*, H. S. Saini, R. Sayal, A. Govardhan, R. Buyya, Eds. Singapore: Springer, pp. 87-98. doi:10.1007/978-981-33-4543-0\_11

[11] A. Hajdu, R. Krecht, A. Suta, Á. Tóth and F. Friedler, "The Resilience Barriers of Automated Ground Vehicles from Military Perspectives," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 94, no. 1, pp. 1195-1200, September 2022. doi:10.3303/CET2294199

[12] A. bin Rashid, M. M. Khan, M. M. Naquib, A. A. M. Anik, A. Rifat and A. A. Tomal, "Remotely Operated Unmanned Ground Vehicle (UGV) with Firing Mechanism for Diverse and Challenging Environments inherent to Military Operation," *The 2nd International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS- 2022), Mirpur Cantonment, Dhaka, 8-10 December 2022*.

[13] R. Krecht, A. Suta, Á. Tóth and Á. Ballagi, "Towards the resilience quantification of (military) unmanned ground vehicles," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 1-7, June 2023. doi:10.1016/j.clet.2023.100644

[14] M. Z. U. Rahman, U. Raza, M. A. Akbar, M. T. Riaz, A. H. Gumaedi and N. Ahmad, "Radio-Controlled Intelligent UGV as a Spy Robot with Laser Targeting for Military Purposes," *Axioms*, vol. 12, no. 176, pp. 1-19, February 2023. doi:10.3390/axioms12020176

[15] S. Wu, S. Li, J. Gong, and Z. Yan, "Modeling and quantitative evaluation method of environmental complexity for measuring autonomous capabilities of military unmanned ground vehicles," *Unmanned Systems*, vol. 11, no. 04, pp. 367-382, October 2023. doi:10.1142/S2301385023500176

[16] L. Pan, C. Song, X. Gan, K. Xu and Y. Xie, "Military Image Captioning for Low-Altitude UAV or UGV Perspectives," *Drones*, vol. 8, no. 421, pp. 1-20, August 2024. doi:10.3390/drones8090421

[17] N. Allahverdi, *Uzman sistemler bir yapay zeka uygulaması*. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 2002. pp. 1-13, 15-23, 71-93.

[18] R. C. Shank, "What is anyway?" *A Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 12-18, 1987.

[19] M. A. Kutlugün, "Gözetimli makine öğrenmesi yoluyla türe göre metinden ses sentezleme," Ms.C. dissertation, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.

[20] E. Alpaydın, *Introduction to Machine Learning (Fourth edition)*. Cambridge, ABD: MIT Press, 2006. pp. 537.

[21] J. VanderPlas, *Python data science handbook: Essential tools for working with data*. USA: O'Reilly Media, Inc., 2016.

[22] V. Raju, J. Mohd, I. HaleemKhan and H. Abid, "Artificial Intelligence (AI) applications for COVID-19 pandemic," *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 337-339, August 2020. doi:10.1016/j.dsx.2020.04.012.

[23] A. Uğur and A. C. Kınacı, "Yapay zeka teknikleri ve yapay sinir ağları kullanılarak web sayfalarının sınıflandırılması," *XI. Türkiye'de İnternet Konferansı, Ankara, Türkiye, 21-23 December 2006*, M. Akgül, E. Derman, U. Çağlayan, A. Özgüt, Eds. Türkiye: TOBB, pp. 345-349.

[24] M. Karanfiloğlu and N. Kara, "İletişimin dijitalleşmesi: Pandemi (Covid-19) ve enformasyon teknolojileri," *Ajit-E: Bilişim Teknolojileri Online Dergisi*, vol. 11, no. 42, pp. 87-99, October 2020. doi:10.5824/ajite.2020.03.003.x

[25] Ö. İnik and E. Ülker, "Derin öğrenme ve görüntü analizinde kullanılan derin öğrenme modelleri," *Gazi Osmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 6, no. 3, pp. 85-105, December 2017. ISSN: 2146-8168

[26] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, May 2015. Doi: 10.1038/nature14539

[27] A. M. Kızrak, and B. Bolat, "Derin öğrenme ile kalabalık analizi üzerine detaylı bir araştırma," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 11 no. 3, pp. 263-286, June 2018. doi:10.17671/gazibtd.419205

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





GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Investigation of Thermomechanical Material Properties of Functionally Graded Sandwich Composite Plates with Metamaterial Honeycomb Core Layer

Kerim Gokhan Aktas<sup>\*a</sup>

Submitted: 08.11.2024 Revised: 06.12.2024 Accepted: 17.12.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR12

### ABSTRACT

**Keywords:** FG sandwich honeycomb plate, metamaterial, thermomechanical, SUS304, ZrO<sub>2</sub>

<sup>a,\*</sup> Karabük University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Mechanical Engineering  
78100-Karabük, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-8076-6799  
e mail: kerimgokhanaktas@karabuk.edu.tr

\*Corresponding author:  
kerimgokhanaktas@karabuk.edu.tr

In this article, the thermomechanical properties of a composite sandwich plate with functionally graded (FG) surface layers and a metamaterial honeycomb core layer are investigated under temperature loading. The hexagonal honeycomb core plate is sandwiched between two surface layers with FG stainless steel (SUS304) and zirconia (ZrO<sub>2</sub>) metal-ceramic matrix. The mechanical and thermal behavior of the core and surface layers changes depending on the temperature. Power law functions and Gibson's equations are employed to specify the equivalent effective material properties of the sandwich plate. Numerical analyses are carried out to investigate the effect of variables such as geometrical parameters of the honeycomb structure, temperature rise and power law parameter on the variation of the thermomechanical material behavior of the sandwich plate. According to the analysis results, it is concluded that the desired thermal and mechanical properties can be tuned by adjusting the honeycomb cell geometric configurations and the material compositions of the FG layers. It is also emphasized that the combination of mechanical and thermal properties in honeycomb structures enables them to perform effectively in demanding environments, where both strength and thermal resistance are required.

## Metamalzeme Bal Peteği Merkez Katmanlı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Sandviç Kompozit Plakaların Termomekanik Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi

### ÖZ

Bu makalede, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) yüzey plakalarına ve bir metamalzeme bal peteği merkez plaka katmanına sahip kompozit bir sandviç plakanın termomekanik özellikleri sıcaklık yükü etkisi altında incelenmiştir. Altıgen bal peteği merkez plakası, FG paslanmaz çelik (SUS304) ve zirkonya (ZrO<sub>2</sub>) metal-seramik matrisli iki yüzey plakası arasına sandviç edilmiştir. Merkez plaka ve yüzey plakaların mekanik ve termal özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Sandviç plakanın eşdeğer etkin malzeme özelliklerini belirlemek için güç yasası fonksiyonları ve Gibson denklemleri kullanılmıştır. Petek yapının geometrik parametreleri, sıcaklık artışı ve güç kanunu parametresi gibi değişkenlerin sandviç plakanın termomekanik malzeme davranışının değişimi üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, petek hücrelerin geometrik konfigürasyonlarının ve FG plakalarının malzeme bileşimlerinin ayarlanmasıyla istenen termal ve mekanik özelliklerin ayarlanabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bal peteği yapılarıdaki mekanik ve termal özelliklerin kombinasyonunun hem mukavemet hem de termal direncin gerekli olduğu zorlu ortamlarda etkili bir şekilde performans göstermelerini sağlayabileceği vurgulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** FD sandviç bal peteği plaka, metamalzeme, termomekanik, SUS304, ZrO<sub>2</sub>

## 1. Introduction

Metamaterials are engineered materials with unique properties that arise from their structure rather than their composition. The integration of metamaterials into sandwich plate designs enhances their mechanical performance, making them suitable for a variety of applications, including aerospace, automotive, and civil engineering. Metamaterials sandwich plates represent a significant advancement in material science, particularly in the fields of acoustics, vibration control, and electromagnetic wave manipulation. In terms of mechanical properties, metamaterials exhibit unique behaviors such as negative Poisson's ratio and non-positive thermal expansion. Negative Poisson's ratio materials expand laterally when stretched, which can be advantageous in applications requiring enhanced energy absorption and structural resilience [1-3]. For example, auxetic mechanical metamaterials have been shown to possess superior energy and acoustic absorption capabilities, making them suitable for applications in vibration control and impact mitigation [4]. The design of metamaterials often involves complex geometrical configurations that allow for tunable mechanical properties. Recent studies have explored hierarchical structures that combine different lattice types to achieve desired mechanical responses, such as enhanced stiffness or flexibility [5-8].

Honeycomb sandwich plates are composite structures that consist of two outer layers and a lightweight core made of honeycomb material. These structures are widely utilized in various engineering applications due to their unique mechanical and thermal properties, including high strength-to-weight ratios, excellent energy absorption capabilities, and good thermal insulation [9,10]. The mechanical properties of honeycombs, such as compressive strength, energy absorption, and stiffness, are influenced by their geometric configurations and material compositions. For instance, the introduction of hierarchical designs in honeycomb structures has been shown to enhance thermal resistance and mechanical performance by allowing for tailored geometric parameters that optimize heat dissipation and structural integrity [5]. One of the significant advantages of honeycomb sandwich plates is their ability to minimize weight while maintaining structural integrity. Research has shown that hexagonal honeycomb cores exhibit lower weight compared to truss lattice cores and monolithic plates, making them an attractive option for applications where weight reduction is critical [9]. Additionally, the dynamic compressive response of honeycomb structures has been extensively studied, revealing that the mechanical properties can be optimized through careful design of the core geometry and material selection [11-13]. For instance, the introduction of auxetic honeycomb structures, which exhibit a negative Poisson's ratio, has been shown to enhance the energy absorption characteristics of sandwich plates under impact loading [14,15]. Thermal properties of honeycomb structures are equally important, especially in high-temperature applications. Research indicates that honeycombs with thicker cores exhibit higher strength and stiffness, which are crucial for maintaining structural integrity under thermal stress [16]. Additionally, the thermal conductivity of honeycomb cores can be optimized through material selection and structural design, allowing for effective thermal management in aerospace applications [17]. The combination of mechanical and thermal properties in honeycomb structures enables them to perform effectively in demanding environments, where both strength and thermal resistance are required.

The incorporation of functionally graded materials (FGMs) within honeycomb structures can further enhance their mechanical properties, allowing for a more controlled response under various loading conditions [18,19]. FGMs are a remarkable subclass of advanced composite materials distinguished by a continuous gradient in composition and properties across their thickness. This gradation facilitates customized mechanical and thermal properties, rendering FGMs especially advantageous in many applications. The thermal properties of FGMs are especially important in applications exposed to high thermal environments [20,21]. The continuous change in thermal conductivity and expansion coefficients enables FGMs to withstand thermal gradients without significant thermal stresses [22,23]. Investigations indicate that FGMs can be designed to demonstrate enhanced thermal insulation or conduction characteristics, based on the specific application demands. The incorporation of FGMs in thermal barrier coatings can markedly enhance thermal resistance of components subjected to elevated temperatures, such as turbine blades in jet engines [24]. The chemical composition of FGMs has been modified to improve their thermal endurance against thermal loads. Duc et al. [25] examined the mechanical and thermal endurance of eccentrically stiffened FG conical shell panels, highlighting the significance of material gradation in enhancing thermal resistance. Zhou et al. [24] investigated the load dispersion in porous metal-ceramic FGMs under thermomechanical load, emphasizing the significance of comprehending the response of these materials to complicated loading circumstances.

According to Chung's [26] study on thermoelastic approaches to FG plates that are subjected to heat mechanical responses are significantly influenced by temperature variations.

The thermal and mechanical characteristics of SUS304 and  $ZrO_2$  are crucial in numerous engineering tasks, especially for FGMs in which both substances are integrated to utilize their beneficial qualities. SUS304 is distinguished for its superior corrosion resistance and mechanical strength, whilst  $ZrO_2$  is esteemed for its elevated thermal endurance and minimal thermal conductivity. When used as a metal-ceramic matrix in FGMs, SUS304 and  $ZrO_2$  can generate materials that incorporate the high strength and flexibility of SUS304 with the thermal insulation characteristics of  $ZrO_2$ . This combination can provide better potential performance in applications in aerospace and automotive applications where materials are exposed to high thermal loads. Grading in material characteristics can also contribute to decreasing thermal stresses and improving the durability of composites under high thermal environments [24,27].

Investigation of the thermomechanical material behavior of composite sandwich plate with metamaterial honeycomb core and metal-ceramic matrix FG surface layers with temperature dependent parameters is a new and unstudied subject. Because of their exceptional mechanical and thermal qualities, SUS304 and  $ZrO_2$  have been chosen as the matrix substances for the suggested sandwich plate, that can be employed in a variety of scientific and technological areas. The proposed study is anticipated to make a significant contribution to the field of high temperature and corrosion applications in electromechanical systems, aerospace, automotive, and marine applications.

## 2. Theoretical Formulation

### 2.1. Model description

A mathematical model of FG sandwich structure with two FG surface layers and honeycomb core layer subjected to temperature load is established, as shown in Figure 1.  $h_c$  and  $h_s$  refer to the thicknesses of the core layer and FG layers, respectively. The honeycomb core of the sandwich structure consists of hexagonal unit cells in a specific arrangement. Also, as shown in the figure, the sandwich plate is subjected to a temperature load along the z-axis. The hexagonal honeycomb core layer is sandwiched between two FG layers. The material utilized for the honeycomb core is SUS304. In addition, SUS304 and  $ZrO_2$  are considered to be distributed with power law distribution in the surface layers.

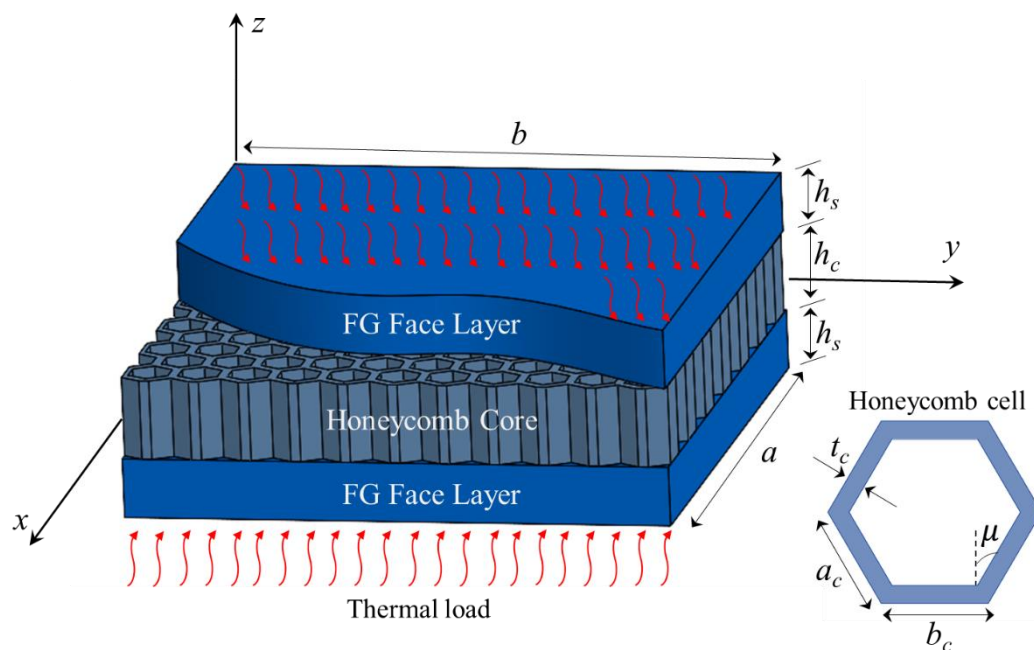


Figure 1. A honeycomb core sandwich plate composed of FG face layers.

## 2.2. Honeycomb cell configuration

The four factors determining the features of every honeycomb unit are length of the inclined cell rib  $a_c$ , angle of inclination  $\mu$ , rib thickness  $t_c$ , and length of the horizontal cell rib  $b_c$ . SUS304 is preferred for the honeycomb plate due to its mechanical and thermal characteristics. Gibson's approach can be used to calculate the hexagonal honeycomb plate's equivalent material characteristics with the formulation that follows [28,29]:

$$E_{11}^c = \frac{E_{SUS304} \xi^3 \cos \mu}{(\psi + \sin \mu) \sin^2 \mu} [1 - \xi^2 \cot^2 \mu] \quad (1)$$

$$E_{22}^c = \frac{E_{SUS304} \xi^3 (\psi + \sin \mu)}{\cos^3 \mu} [1 - \xi^2 (\psi \sec^2 \mu + \tan^2 \mu)] \quad (2)$$

$$E_{33}^c = \frac{E_{SUS304} \xi (2 + \psi)}{2(\psi + \sin \mu) \cos \mu} \quad (3)$$

$$G_{12}^c = \frac{E_{SUS304} \xi^3 (\Omega + \sin \mu)}{\psi^2 (1 + 2\psi) \cos \mu} \quad (4)$$

$$G_{13}^c = \frac{G_{SUS304} \xi \cos \mu}{\psi + \sin \mu} \quad (5)$$

$$G_{23}^c = \frac{G_{SUS304} \xi \left[ \frac{\psi + \sin \mu}{(1 + 2\psi) \cos \mu} + \frac{\psi + 2 \sin^2 \mu}{2(\psi + \sin \mu)} \right]}{2 \cos \mu} \quad (6)$$

$$\rho^c = \frac{\rho_{SUS304} \xi (\psi + 2)}{2 \cos \mu (\psi + \sin \mu)} \quad (7)$$

in which  $\xi = t_c/a_c$  and  $\psi = b_c/a_c$ . Based on the geometric variables, the corresponding coefficients for Poisson's ratio  $\nu^c$ , thermal expansion  $\alpha^c$ , and thermal conductivity  $\kappa^c$  can be obtained in the manner shown below:

$$\nu_{12}^c = \frac{\cos^2 \mu}{(\psi + \sin \mu) \sin \mu} [1 - \xi^2 \csc^2 \mu] \quad (8)$$

$$\nu_{21}^c = \frac{(\psi + \sin \mu) \sin \mu}{\cos^2 \mu} [1 - \xi^2 (1 + \psi) \sec^2 \mu] \quad (9)$$

$$\alpha^c = \frac{\alpha_{SUS304} \xi (\psi + 2)}{2 \cos \mu (\psi + \sin \mu)} \quad (10)$$

$$\kappa^c = \frac{\kappa_{SUS304} \xi (\psi + 2)}{2 \cos \mu (\psi + \sin \mu)} \quad (11)$$

## 2.3. FG face layers

The core layer made of honeycomb cells is sandwiched between two FG composite plate layers. The top surface of the FGM layers is considered to be ZrO<sub>2</sub> and the bottom surface is considered to be SUS304. The mechanical and thermal variables of the surface layers vary uniformly throughout the  $z$  axis according to the power law distribution. The effective mechanical and thermal properties of the FGM face plates can be calculated as [30]:

$$E_{ef} = E_{ZrO_2} + (E_{SUS304} - E_{ZrO_2})V^i \quad (i = tl, bl) \quad (12)$$

$$v_{ef} = v_{ZrO_2} + (v_{SUS304} - v_{ZrO_2})V^i \quad (i = tl, bl) \quad (13)$$

$$\rho_{ef} = \rho_{ZrO_2} + (\rho_{SUS304} - \rho_{ZrO_2})V^i \quad (i = tl, bl) \quad (14)$$

$$\alpha_{ef} = \alpha_{ZrO_2} + (\alpha_{SUS304} - \alpha_{ZrO_2})V^i \quad (i = tl, bl) \quad (15)$$

$$\kappa_{ef} = \kappa_{ZrO_2} + (\kappa_{SUS304} - \kappa_{ZrO_2})V^i \quad (i = tl, bl) \quad (16)$$

where the subscripts *SUS304* and *ZrO<sub>2</sub>* refer to the material properties of the metal and ceramic matrix respectively, while the superscripts *bl* and *tl* represent the lower and upper FG layers. Furthermore, the  $\rho_{ef}$ ,  $v_{ef}$ ,  $\alpha_{ef}$ ,  $\kappa_{ef}$ , and  $E_{ef}$  indicate the effective properties of surface layers. The following approach can be employed to determine the volume ratio, denoted as  $V^i$ , utilizing the power-law distribution [31,32]:

$$V^{bl} = \left( \frac{1}{2} - \frac{2z + h_c + h_s}{2h_s} \right)^n \quad h_1 \leq z \leq h_2 \quad (17)$$

$$V^{tl} = \left( \frac{1}{2} + \frac{2z - h_c - h_s}{2h_s} \right)^n \quad h_3 \leq z \leq h_4$$

in which  $h_1 = -h_c/2 - h_s$ ,  $h_2 = -h_c/2$ ,  $h_3 = h_c/2$  and  $h_4 = h_c/2 + h_s$ . The variable  $z$  represents the location toward the neutral axis, whereas the variable  $n$  symbolizes the power-law parameter (for  $n = 0$ ,  $v_{ef} = v_{SUS304}$  and for  $n = \infty$ ,  $v_{ef} = v_{ZrO_2}$ ).

The FG sandwich composite plate's physical properties change as a function of temperature. A nonlinear temperature equation can be utilized to describe the thermal and mechanical properties in the following way [33–35]:

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (18)$$

where  $T = T_0 + \Delta T$  and  $T_0 = 300$  K.  $P_0$ ,  $P_{-1}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_3$  refer to the temperature-dependent material constants. The temperature is regarded as exhibiting a nonlinear change. Under certain temperature constraints, Eq. (18) can be computed to find the top and bottom layer temperatures ( $T_t$  and  $T_b$ ) of the plate [36].

$$-\frac{d}{dz} \left[ \kappa(z, T) \frac{dT}{dz} \right] = 0, \quad T \left( \frac{h_c}{2} + h_s \right) = T_t, \quad T \left( -\frac{h_c}{2} - h_s \right) = T_b \quad (19)$$

where  $\kappa$  denotes the thermal conductivity coefficient. In addition,  $h_c$  and  $h_s$  define the core and FG layer thicknesses, respectively.

The equation that follows can be used to calculate the temperature of any place along the thickness direction [37]:

$$T(z) = T_b + \frac{(T_t - T_b) \int_{-\frac{h}{2}}^z \frac{1}{\kappa(z, T)} dz}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{\kappa(z, T)} dz} \quad (20)$$



### 3. Results and Discussion

In this section, the variation of thermomechanical material properties (effective modulus of elasticity, Poisson's ratio, thermal expansion coefficient, and thermal conductivity coefficient) of sandwich FG honeycomb core plate are investigated under temperature loading. The simulations are based on the following nanostructure fundamental variables:  $a = b = 400$  nm,  $h = a/10$ ,  $h_c = 0.6h$  and  $h_s = 0.2h$ . The temperature dependent mechanical and thermal properties of ZrO<sub>2</sub> and SUS304 ceramic-metal matrix are listed in Table 1.

Table 1. Mechanical and thermal constants of SUS304 and ZrO<sub>2</sub> [33], [35].

Material	Properties	$P_{-1}$	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
SUS304	$E$ (Pa)	0	$201.04 \times 10^9$	$3.079 \times 10^{-4}$	$-6.534 \times 10^{-7}$	0
	$\nu$	0	0.3262	$-2.002 \times 10^{-4}$	$3.97 \times 10^{-7}$	0
	$\alpha$ (1K <sup>-1</sup> )	0	$12.33 \times 10^{-6}$	$8.086 \times 10^{-4}$	0	0
	$\kappa$ (W/mK)	0	15.397	$-1.264 \times 10^{-3}$	$2.09 \times 10^{-6}$	$-7.223 \times 10^{-10}$
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0	8166	0	0	0
ZrO <sub>2</sub>	$E$ (Pa)	0	$244.27 \times 10^9$	$-1.371 \times 10^{-3}$	$1.214 \times 10^{-6}$	$-3.681 \times 10^{-10}$
	$\nu$	0	0.2882	$1.133 \times 10^{-4}$	0	0
	$\alpha$ (1K <sup>-1</sup> )	0	$12.766 \times 10^{-6}$	$-1.491 \times 10^{-3}$	$1.006 \times 10^{-5}$	$-6.778 \times 10^{-11}$
	$\kappa$ (W/mK)	0	1.70	$1.276 \times 10^{-4}$	$6.648 \times 10^{-8}$	0
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0	2370	0	0	0

#### 3.1. Verification of the solution strategy

In order to prove the validity of the solution method presented in the study, a comparison is made with the existing work in the literature. The comparison study includes a comparison of the mechanical and thermal properties of a sandwich plate containing magneto-electro-elastic surface layers reported by Koç et al [38]. In the study, the core layer consists of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SUS304 ceramic-metal matrix, while the surface layers consist of 50% BaTiO<sub>3</sub> and 50% CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. The plate dimensions and material properties are based on the reference study. The effective modulus of elasticity ( $E$ ) and effective thermal conductivity coefficient ( $\kappa$ ) are compared for two different temperature rise values and four different power law parameters. As shown in Table 2, the results of the reference study and the present study are very close.

Table 2. Comparison of the effective material properties ( $E$  and  $\kappa$ ).

$\Delta T$	$n$	$E$ (Pa)		$\kappa$ (W/mK)	
		Ref. [38]	Present	Ref. [38]	Present
400	0	$2.97 \times 10^{11}$	$2.92 \times 10^{11}$	$0.89 \times 10^{-5}$	$0.93 \times 10^{-5}$
	0.5	$2.68 \times 10^{11}$	$2.61 \times 10^{11}$	$1.11 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-5}$
	1	$2.52 \times 10^{11}$	$2.44 \times 10^{11}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$1.29 \times 10^{-5}$
	5	$2.23 \times 10^{11}$	$2.16 \times 10^{11}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-5}$
600	0	$2.88 \times 10^{11}$	$2.83 \times 10^{11}$	$1.09 \times 10^{-5}$	$1.18 \times 10^{-5}$
	0.5	$2.58 \times 10^{11}$	$2.52 \times 10^{11}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$
	1	$2.42 \times 10^{11}$	$2.33 \times 10^{11}$	$1.46 \times 10^{-5}$	$1.61 \times 10^{-5}$
	5	$2.14 \times 10^{11}$	$2.04 \times 10^{11}$	$1.71 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-5}$

#### 3.2. Effective thermomechanical material properties of the honeycomb sandwich structure

In this subsection, variation of thermomechanical material properties ( $E$ ,  $\nu$ ,  $\alpha$  and  $\kappa$ ) of sandwich FG honeycomb core plate with respect to temperature rise ( $\Delta T$ ), power law distribution ( $n$ ) and honeycomb geometrical parameters ( $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$ ) are investigated in the range of 0-1000 K. Analytical examinations are performed for four distinct power law constants ( $n=0, 1, 2$ , and  $10$ ). While FG surface layers exhibit completely SUS304 properties at  $n=0$ , the plate properties approach ZrO<sub>2</sub> with increasing

$n$ . The analyses are carried out by considering the thickness-to-length of the inclined cell rib ratio  $\xi = 0.025, 0.1, 0.2$  and  $0.3$ , length of the horizontal cell rib-to-length of the inclined cell rib ratio  $\psi = 0.5, 1, 2$  and  $4$  and inclination angle  $\mu = 30^\circ, 45^\circ$  and  $60^\circ$ .

Figure 2 presents the variation of the equivalent effective elastic modulus of the sandwich plate with respect to  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$ . As shown in Figure 2a,  $E$  decreases nonlinearly with increasing  $\Delta T$ . In addition, the equivalent modulus of elasticity of the sandwich plate decreases significantly with increasing  $n$ . This decrease is due to the difference in  $E$  value of  $ZrO_2$  and SUS304. When Table 1 is examined, it is seen that the  $P_0$  value of  $ZrO_2$  is higher than SUS304. Accordingly, the initial values of the  $n = 10$  curve should be higher than the  $n = 0$  curve. However, since the young modulus of  $ZrO_2$  decreases much faster than SUS304 at low temperatures, the  $n = 10$  curve is positioned lower than the  $n = 0$  curve. As shown in Figure 2b, Figure 2c and Figure 2d, the modulus of elasticity of the sandwich plate decreases with increasing  $\psi$  and  $\mu$ , while it increases with increasing  $\xi$ . From the evaluation of the figures, it is concluded that the  $n$  parameter affects the equivalent effective  $E$  value of the plate the most and the  $\psi$  parameter the least.

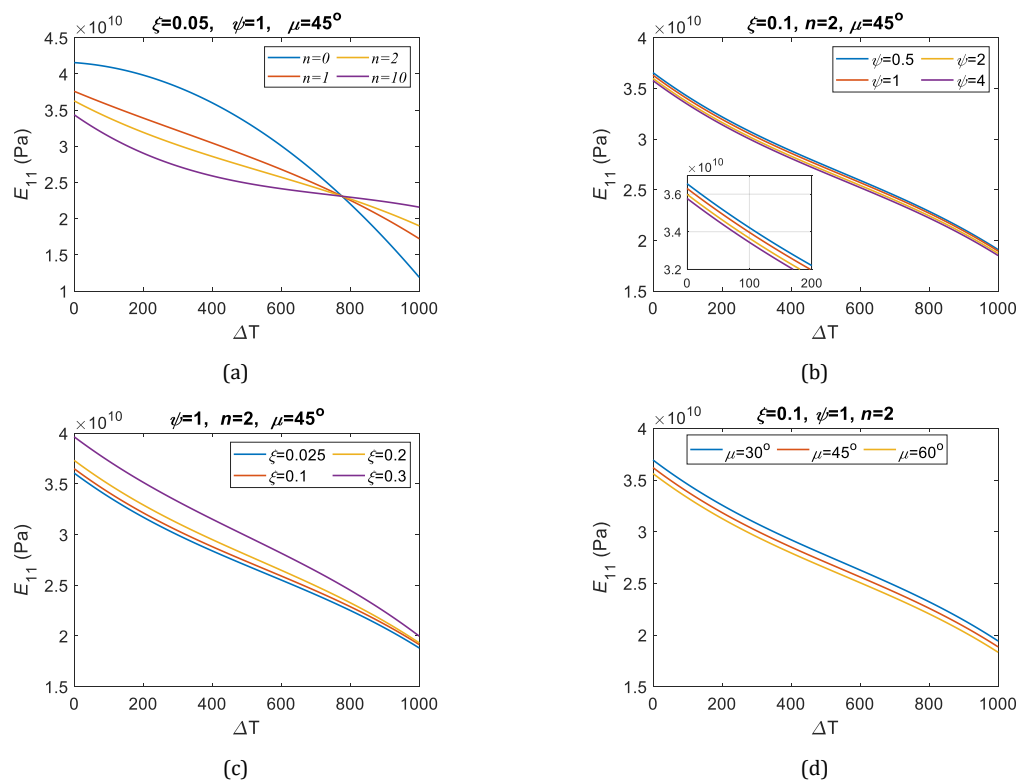


Figure 2. Variation of the effective modulus of elasticity  $E_{11}$  with respect to  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters.

The variation of the equivalent effective Poisson's ratio  $\nu_{12}$  of the sandwich plate with respect to parameters  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  is depicted in Figure 3. As shown in Figure 3a,  $\nu_{12}$  increases nonlinearly with increasing  $\Delta T$ , while it decreases with increasing  $n$ . The reason for the rise in  $\nu_{12}$  is the softening behavior of the plate with increasing  $\Delta T$ , while the reason for the decrease is that the  $ZrO_2$  composition in the plate becomes more dominant with increasing  $n$ . As shown in Figure 3b, Figure 3c and Figure 3d, increasing  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  have a decreasing effect on the effective  $\nu_{12}$  value. From the detailed examination of the figures, it is determined that the parameters  $n$  and  $\Delta T$  affect the effective Poisson's ratio less than the geometrical parameters  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$ . It is also shown that  $\psi$  and  $\mu$  are the dominant parameters in determining the effective  $\nu_{12}$ . For example, considering the curves  $\psi = 0.5$  and  $\psi = 4$ , it is seen that there is an increase of about 159.88% at  $\Delta T = 1000$  K.

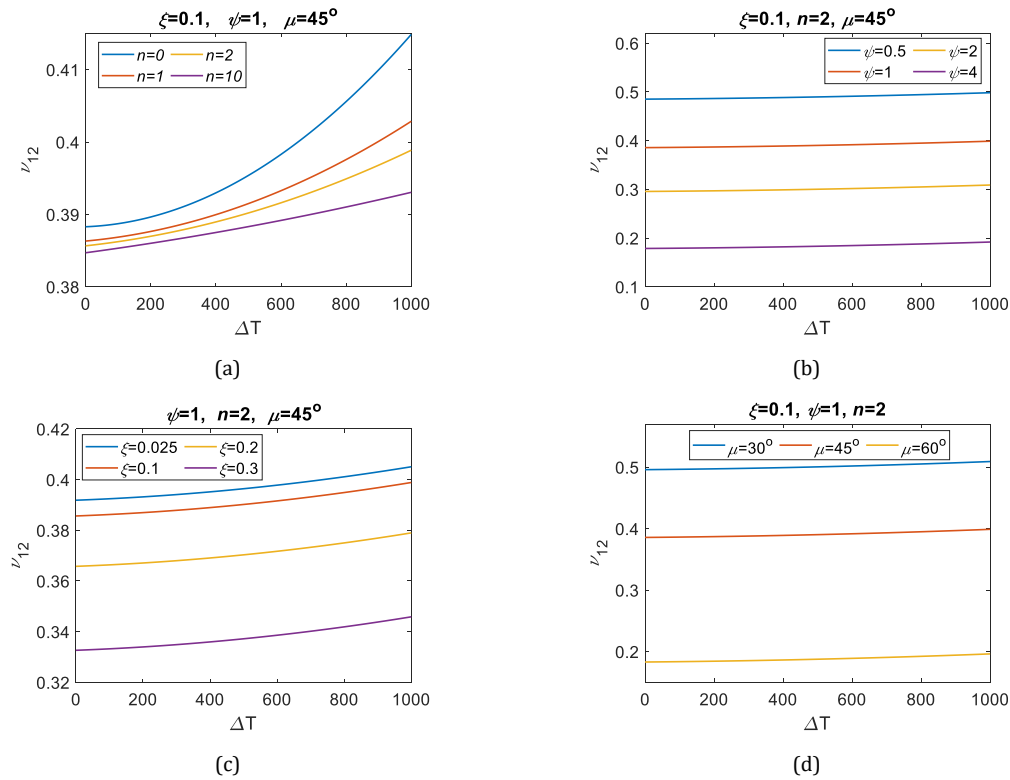


Figure 3. Variation of the effective Poisson's ratio  $v_{12}$  depending on the  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters.

Figure 4 graphically illustrates the variations of the coefficient of effective thermal expansion  $\alpha$  of the sandwich plate with respect to parameters  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$ . As depicted in Figure 4a, increasing  $\Delta T$  and  $n$  have an increasing effect on the effective  $\alpha$  coefficient of the sandwich plate. The reason for this increase is attributed to the softening tendency of the plate with rising  $\Delta T$  and the increase in the  $ZrO_2$  ratio in the surface layers with increasing  $n$ . As given in Table 1, although the thermal expansion coefficients of SUS304 and  $ZrO_2$  at low temperatures are close to each other, there is a significant difference between the  $n = 0$  and  $n = 10$  curves in Figure 4a. The reason for this difference is attributed to the superior thermal expansion properties of  $ZrO_2$  at high temperatures and the rapid increase in  $\alpha$ . Furthermore, as depicted in Figure 4b, Figure 4c and Figure 4d, increasing  $\xi$  and  $\mu$  have an increasing effect on  $\alpha$  coefficient, whereas increasing  $\psi$  has a decreasing effect. It can be concluded from Figure 4 that the honeycomb geometrical parameters affect the  $\alpha$  values less than  $\Delta T$  and  $n$  and that  $\Delta T$  has the highest effect on the change in the thermal expansion coefficient and  $\psi$  has the least.

The variation of the equivalent effective thermal conductivity coefficient of the sandwich plate with respect to parameters  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  is evaluated in Figure 5. As indicated in Figure 5a,  $\kappa$  increases with rising  $\Delta T$  while  $\kappa$  decreases with increasing  $n$ . When  $n = 0$  and  $n = 10$  curves are examined, it is seen that  $\kappa$  decreases from 4.416 1/K to 2.088 1/K at  $\Delta T = 500$  K. That is, a decrease of 111.494%. The reason for these decreases is the superior thermal conductivity of SUS304 compared to  $ZrO_2$  and the fact that  $ZrO_2$  is not affected much by the temperature rise. Furthermore, as shown in Figures 5b, 5c and 5d,  $\xi$  and  $\mu$  show a similar trend, leading to an increase in  $\kappa$ , while increasing  $\psi$  has the inverse effect, leading to a decrease in  $\kappa$ .

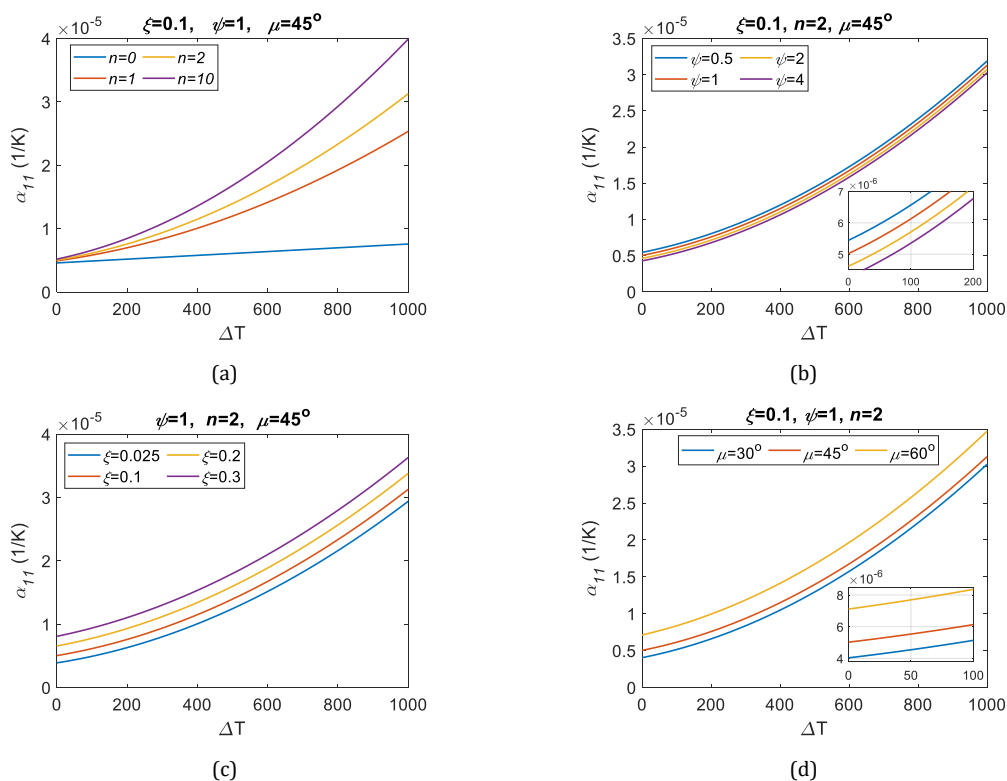


Figure 4. Variation of the effective coefficient of thermal expansion  $\alpha_{11}$  with respect to  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters.

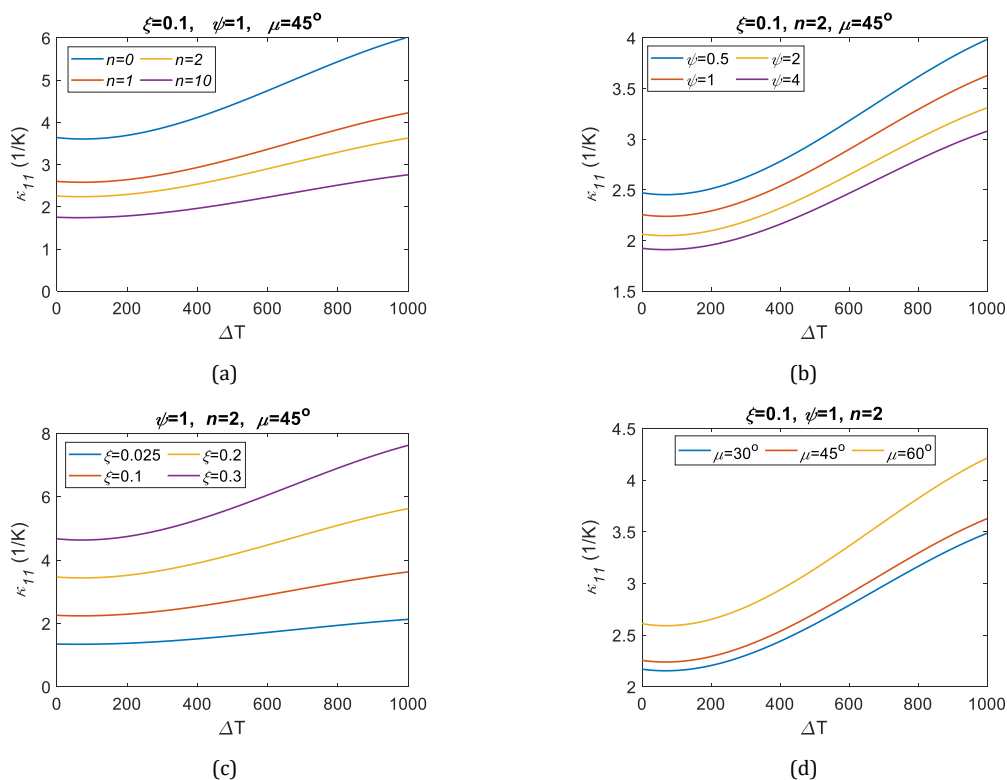


Figure 5. Variation of the effective coefficient of thermal conductivity  $\kappa_{11}$  depending on the  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters.

## 4. Conclusions

In this paper, the variation of thermomechanical characteristics of sandwich structure with honeycomb plate and ceramic-metal matrix FGM surface layers are investigated with respect to variables such as

temperature rise, power law index and geometrical parameters of honeycomb cells. To determine the effective equivalent material characteristics of the sandwich plate, power law equations are employed for FG surface layers, while Gibson equations based on the geometric dimensions of hexagonal cells are employed for the honeycomb core. According to the parametric analyses, some important outcomes are obtained. When the effect of  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters on the effective  $E$  value of the sandwich plate is examined, it is determined that  $E$  decreases with increasing  $\Delta T$ ,  $n$  and  $\psi$ , whereas it increases with increasing  $\xi$ . Furthermore, it has been found that the parameter providing the greatest influence on the modulus of elasticity of the sandwich plate is the  $\Delta T$ , whereas the parameter with the least impact is  $\psi$ . From the effective Poisson's ratio plots, it is seen that the Poisson's ratio decreases with increasing  $n$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  and  $\mu$  parameters but decreases with increasing  $\Delta T$ . In addition, when the percentage increases and decreases of the Poisson's ratio of the sandwich structure are examined, it is determined that honeycomb cell parameters are more dominant than the other parameters. Parameters  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $\xi$  and  $\mu$  increase the coefficient of thermal expansion of the sandwich plate with a similar trend, while increasing  $\psi$  decreases  $\alpha$ . Moreover, the most effective parameter in the variation of the  $\alpha$  parameter of the sandwich plate is  $\Delta T$  while the least effective parameter is  $\psi$ . From the examination of the thermal conductivity curves, it is inferred that the  $\kappa$  coefficient decreases with increasing  $n$  and  $\psi$  parameters and increases with increasing  $\xi$  and  $\mu$  values. The thermomechanical characteristics of sandwich plates including a honeycomb core can be improved via selection of materials and structural design, enabling efficient thermal and mechanical management in high-temperature, noise, and corrosion environments. The results are expected to contribute to the gap in the literature on the current research topic.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

## References

- [1] L. Ai and X. Gao, "Metamaterials with negative Poisson's ratio and non-positive thermal expansion," *Composite Structures*, vol. 162, pp. 70–84, 2017. doi:10.1016/j.compstruct.2016.11.056
- [2] W. Zhang, S. Zhao, F. Scarpa, J. Wang, and R. Sun, "In-plane mechanical behavior of novel auxetic hybrid metamaterials," *Thin-Walled Structures*, vol. 159, pp. 107191, 2021. doi:10.1016/j.tws.2020.107191
- [3] K. G. Aktas, "Three-dimensional thermomechanical wave propagation analysis of sandwich nanoplate with graphene-reinforced foam core and magneto-electro-elastic face layers using nonlocal strain gradient elasticity theory," *Acta Mechanica*, vol. 235, no. 9, pp. 5587–5619, 2024. doi:10.1007/s00707-024-04001-1
- [4] W. Zhang, Z. Li, J. Wang, F. Scarpa, and X. Wang, "Mechanics of novel asymmetrical re-entrant metamaterials and metastructures," *Composite Structures*, vol. 291, pp. 115604, 2022. doi:10.1016/j.compstruct.2022.115604
- [5] Y. Chen, Z. Jia, and L. Wang, "Hierarchical honeycomb lattice metamaterials with improved thermal resistance and mechanical properties," *Composite Structures*, vol. 152, pp. 395–402, 2016. doi:10.1016/j.compstruct.2016.05.048
- [6] K. Billon *et al.*, "Mechanics and band gaps in hierarchical auxetic rectangular perforated composite metamaterials," *Composite Structures*, vol. 160, pp. 1042–1050, 2017. doi:10.1016/j.compstruct.2016.10.121
- [7] M. Eroğlu, İ. Esen, and M. A. Koç, "Managing the surface piezoelectricity effect of the smart ZnO sandwich nanoplates using metal foam core layer and GPRL reinforced rim layers," *Microsystem Technologies*, 2024. doi:10.1007/s00542-024-05772-2
- [8] M. Eroğlu, İ. Esen, and M. A. Koç, "Effect of the magnetic field on the thermomechanical flexural wave propagation of embedded sandwich nanobeams," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 52, no. 10, pp. 7795–7827, Oct. 2024. doi:10.1080/15397734.2024.2308659
- [9] A. H. Abdulaziz, M. Hedaya, A. Elsabbagh, K. M. Holford, and J. McCrory, "Acoustic emission wave propagation in honeycomb sandwich panel structures," *Composite Structures*, vol. 277, pp. 114580, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114580
- [10] E. Zurnacı and H. K. Özdemir, "Investigation of the compressive strength, energy absorption properties and deformation modes of the reinforced core cell produced by the FDM method," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2023. doi:10.30855/gmbd.0705047
- [11] Y. Tao, M. Chen, H. Chen, Y. Pei, and D. Fang, "Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: Experiment and theory," *Composite Structures*, vol. 132, pp. 644–651, 2015. doi:10.1016/j.compstruct.2015.06.015
- [12] J. Zhang, Z. Yan, and L. Xia, "Vibration and flutter of a honeycomb sandwich plate with zero Poisson's ratio," *Mathematics*, vol. 19, no. 9, pp. 2528, 2021. doi:10.3390/math9192528



- [13] M. F. Sarıbaş and S. Karadeniz, "Bir uçak kanadının hücum kenarına kuş çarpmasının düzgün parçacık hidrodinamiği yöntemiyle sayısal incelenmesi," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 547–566, 2021. doi:10.30855/gmbd.0705042
- [14] H. L. Tan, Z. C. He, K. X. Li, E. Li, A. G. Cheng, and B. Xu, "In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio," *Composite Structures*, vol. 229, p. 111415, 2019. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111415
- [15] N. V. Nguyen, H. Nguyen-Xuan, T. N. Nguyen, J. Kang, and J. H. Lee, "A comprehensive analysis of auxetic honeycomb sandwich plates with graphene nanoplatelets reinforcement," *Composite Structures*, vol. 259, pp. 113213, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113213
- [16] O. A. Ganilova, M. P. Cartmell, and A. Kiley, "Experimental Investigation of the thermoelastic performance of an aerospace aluminium honeycomb composite panel," *Composite Structures*, vol. 257, pp. 113159, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113159
- [17] Y. Zhou, A. Liu, Y. Xu, Y. Guo, X. Yi, and Y. Jia, "Frequency-dependent orthotropic damping properties of nomex honeycomb composites," *Thin-Walled Structures*, vol. 160, p. 107372, 2021. doi:10.1016/j.tws.2020.107372
- [18] H. Liu, E. T. Zhang, and B. F. Ng, "In-plane dynamic crushing of a novel honeycomb with functionally graded fractal self-similarity," *Composite Structures*, vol. 270, p. 114106, 2021. doi:10.1016/j.compstruct.2021.114106
- [19] A. F. Ozalp and I. Esen, "Thermal buckling response of foam core smart sandwich nanoplates with electro-elastic and magneto-strictive layers," *Acta Mechanica*, 2024. doi:10.1007/s00707-024-04155-y
- [20] R. Özmen and I. Esen, "Thermomechanical flexural wave propagation responses of FG porous nanoplates in thermal and magnetic fields," *Acta Mechanica*, vol. 234, no. 11, pp. 5621–5645, 2023. doi:10.1007/s00707-023-03679-z
- [21] R. Özmen, R. Kılıç, and I. Esen, "Thermomechanical vibration and buckling response of nonlocal strain gradient porous FG nanobeams subjected to magnetic and thermal fields," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 31, no. 4, pp. 834–853, 2024. doi:10.1080/15376494.2022.2124000
- [22] P. Chen, S. Chen, and Z. Peng, "Thermo-contact mechanics of a rigid cylindrical punch sliding on a finite graded layer," *Acta Mechanica*, vol. 223, no. 12, pp. 2647–2665, 2012. doi:10.1007/s00707-012-0732-y
- [23] Y. Z. Wang, D. Liu, Q. Wang, and J. Zhou, "Asymptotic analysis of thermoelastic response in functionally graded plate subjected to a transient thermal shock," *Composite Structures*, vol. 139, pp. 233–242, 2016. doi:10.1016/j.compstruct.2015.12.014
- [24] W. Zhou, R. Zhang, S. Ai, R. He, Y. Pei, and D. Fang, "Load distribution in threads of porous metal–ceramic functionally graded composite joints subjected to thermomechanical loading," *Composite Structures*, vol. 134, pp. 680–688, 2015. doi:10.1016/j.compstruct.2015.08.113
- [25] N. D. Duc *et al.*, "Mechanical and thermal stability of eccentrically stiffened functionally graded conical shell panels resting on elastic foundations and in thermal environment," *Composite Structures*, vol. 132, pp. 597–609, 2015. doi:10.1016/j.compstruct.2015.05.072
- [26] Y. L. Chung, "Thermoelastic closed-form solutions of FGM plates subjected to temperature change in longitudinal and thickness directions," *Meccanica*, vol. 57, pp. 355–369, 2022. doi:10.1007/s11012-021-01431-2
- [27] A. Hajlaoui, A. Jarraya, K. El Bikri, and F. Dammak, "Buckling analysis of functionally graded materials structures with enhanced solid-shell elements and transverse shear correction," *Composite Structures*, vol. 132, pp. 87–97, 2015. doi:10.1016/j.compstruct.2015.04.059
- [28] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. in Cambridge solid state science series. Cambridge University Press, 1997.
- [29] M. Sobhy and F. H. H. Al Mukahal, "Wave dispersion analysis of functionally graded GPLs-reinforced sandwich piezoelectromagnetic plates with a honeycomb core," *Mathematics*, vol. 10, no. 17, 2022. doi:10.3390/math10173207
- [30] Y. Amini, H. Emdad, and M. Farid, "Finite element modeling of functionally graded piezoelectric harvesters," *Composite Structures*, vol. 129, pp. 165–176, 2015. doi:10.1016/j.compstruct.2015.04.011
- [31] H. T. Thai and D. H. Choi, "A simple first-order shear deformation theory for the bending and free vibration analysis of functionally graded plates," *Composite Structures*, vol. 101, pp. 332–340, 2013. doi:10.1016/j.compstruct.2013.02.019
- [32] M. Nouraei, V. Zamani and Ö. Civalek, "Vibration of smart sandwich plate with an auxetic core and dual-FG nanocomposite layers integrated with piezoceramic actuators," *Composite Structures*, vol. 315, pp. 117014, 2023. doi:10.1016/j.compstruct.2023.117014
- [33] Y. S. Touloukian, *Thermophysical properties of high temperature solid materials*. New York: Macmillan, 1967.
- [34] Y. S. Touloukian, *Thermophysical properties of high temperature solid materials: Oxides and their solutions and mixtures*. New York: Macmillan, 1966.
- [35] J. N. Reddy and C. D. Chin, "Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 21, no. 6, pp. 593–626, 1998. doi:10.1080/01495739808956165

[36] D. G. Zhang, "Thermal post-buckling and nonlinear vibration analysis of FGM beams based on physical neutral surface and high order shear deformation theory," *Meccanica*, vol. 49, no. 2, pp. 283–293, 2014. doi:10.1007/s11012-013-9793-9

[37] F. Ebrahimi and M. R. Barati, "Electromechanical buckling behavior of smart piezoelectrically actuated higher-order size-dependent graded nanoscale beams in thermal environment," *International Journal of Smart and Nano Materials*, vol. 7, no. 2, pp. 69–90, 2016. doi:10.1080/19475411.2016.1191556

[38] M. A. Koç, İ. Esen, and M. Eroğlu, "Thermomechanical vibration response of nanoplates with magneto-electro-elastic face layers and functionally graded porous core using nonlocal strain gradient elasticity," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 31, no. 18, pp. 4477–4509, 2023. doi:10.1080/15376494.2023.2199412

---

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## An Overview of the Reflections of Nanotechnology Applications on the Textile Industry and Future Perspectives

Semahat Doruk<sup>a</sup>, Burcu Ulutas<sup>c</sup>, Muhammed Bora Akin<sup>\*c</sup>,

Submitted: 15.08.2024 Revised: 02.11.2024 Accepted: 26.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR11

### ABSTRACT

**Keywords:** Nanotechnology, Textile, Fabric, Innovation

<sup>a</sup> Çankırı Karatekin University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Chemical Engineering  
18100 - Çankırı, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-8476-2544

<sup>b</sup> Çankırı Karatekin University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Chemical Engineering  
18100 - Çankırı, Türkiye  
Orcid: 0009-0002-9176-2790

<sup>c\*</sup> Çankırı Karatekin University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Chemical Engineering  
18100 - Çankırı, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3841-1633  
e mail: mbakin@karatekin.edu.tr

\*Corresponding author:  
mboraakin@gmail.com

Textiles are integral to human life, spanning uses from clothing and home decor to industrial applications and economic contributions. Garments and accessories showcase personal expression, while home textiles enhance living spaces and provide comfort. The textile industry also offers employment to millions globally, with traditional textiles influencing cultural, social, and economic aspects of life. However, specific conditions demand specialized textiles. In industries like metal and chemical production, textiles with high heat resistance, flame retardancy, or chemical protection require advanced engineering and manufacturing technologies. As living conditions evolve, so do the demands on textiles. Beyond current features such as antibacterial properties, resistance to temperature extremes, and durability, future textiles will incorporate advanced functionalities. Innovations may include energy self-generation, integration with the Internet of Things (IoT), and sensor-based health monitoring to continuously track human well-being. This article explores recent advancements in nanotechnology applications in textiles and provides a roadmap for the future, emphasizing how technology is reshaping this essential industry to meet emerging needs.

## Nanoteknoloji Uygulamalarının Tekstil Endüstrisine Yansımaları ve Gelecek Perspektifi Üzerine Genel Bir Bakış

### ÖZ

Tekstiller, insan yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır ve giyimden ev dekorasyonuna, endüstriyel uygulamalardan ekonomik katkılara kadar geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Giysi ve aksesuarlar kişisel ifadeyi yansıtırken, ev tekstilleri yaşam alanlarını güzelleştirir ve konfor sağlar. Tekstil sektörü ayrıca dünya genelinde milyonlarca kişiye istihdam sağlamaktadır ve geleneksel tekstiller kültürel, sosyal ve ekonomik açıdan yaşamı etkilemektedir. Ancak, belirli koşullar özel tekstillere ihtiyaç duyar. Metal ve kimyasal üretim gibi sektörlerde, yüksek ısı direnci, alev geciktirici özellikler veya kimyasal koruma sağlayan tekstiller, ileri mühendislik ve üretim teknolojilerini gerektirir. Değişen yaşam koşulları, tekstillerin de bu ihtiyaçlara uyum sağlamasını zorunlu kılmaktadır. Antibakteriyel özellikler, ani ve büyük sıcaklık değişimlerine dayanıklılık ve fiziksel aşınmaya karşı koruma gibi güncel özelliklerin ötesinde, gelecekte tekstillerin enerji üretebilmesi, Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyon sağlayabilmesi ve insan sağlığını sürekli izlemek için sensörlerle donatılması beklenmektedir. Bu makale, tekstillerde nanoteknolojinin son uygulamalarını inceleyerek geleceğe yönelik bir yol haritası sunmakta ve bu temel endüstrinin teknolojik yeniliklerle nasıl şekillendiğini vurgulamaktadır..

#### Anahtar Kelimeler:

Nanoteknoloji, Tekstil, Kumaş, İnovasyon

## 1. Giriş (Introduction)

Tekstil endüstrisinde, gelişmiş özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi önemli ölçüde mühendislik birikimi kullansa da sınırların aşılması nanoteknoloji sayesinde mümkün olmaktadır. Nanoteknoloji kullanımı ile tekstil malzemeleri, leke direnci, alev geciktiricilik, kırışıklık direnci, nem yönetimi, antimikrobiyal özellikler, UV koruma ve toprak salım özellikleri gibi işlevler kazanabilmektedir [1]. Bu ilerlemeler çeşitli sektörlerde kullanılabilen yüksek performanslı tekstil malzemelerinin üretimini sağlamıştır [2]. Nanoteknoloji, akıllı ve çok fonksiyonlu tekstillerin üretimini kolaylaştırmış, böylece otomobilden ilaca geniş bir yelpazede uygulanabilen, sporculardan askerlere kadar farklı bireylere hitap eden ürünler ortaya çıkmıştır [3].

Nanoteknolojinin tekstillerde kullanımı, estetik, nefes alabilirlik ve esneklik gibi tekstillerin doğal özelliklerini korurken çeşitli işlevlere akıllı tekstillerin üretimine olanak tanımaktadır [4]. Tekstil malzemelerini işlevsel hale getirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [5]. Nanoteknolojinin entegrasyonu, dayanıklılık, rahatlık, çevreye dost ürünlerin üretimi mümkün olmakta ve tüm bunların dışında üretim sırasında enerji tasarrufu sağlamak da mümkün olmaktadır [6].

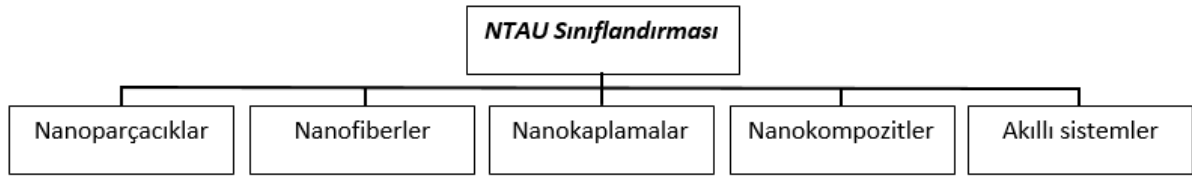
Tekstildeki nanoteknoloji uygulaması biyotıp, algılama teknolojisi ve hatta COVID-19 gibi hastalıklarla mücadele gibi alanlara kadar uzanarak tıp alanında karşılık bulmuştur [7,8].  $TiO_2$  ve  $ZnO$  gibi nanopartiküller, liflerde statik yükün dağıtılmasında kullanılmış, tekstillerde nanomalzemelerin elektrik iletkenliğinin avantajları da ortaya çıkarılmıştır [9]. Sadece bu örnekler bile nanoteknolojinin tekstiller üzerinde yeni çalışmalara açacağı yolları sergilemektedir.

### 1.1. Tekstil endüstrisinde nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications in the textile industry)

Nanoteknoloji, tekstil endüstrisi dahil olmak üzere çeşitli sektörler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Tekstil ürünlerinde nanoteknolojinin entegrasyonu, sadece geliştirilmiş işlevselliklere sahip yenilikçi ürünlerin geliştirilmesi değil aynı zamanda üretim aşamasındaki nanoteknolojiye sahip teknolojinin kullanımını da kapsamaktadır. Nanoteknoloji ürünü olan gümüş nanopartiküller ile üretilen tekstiller, antibakteriyel, antiviral ve anti-inflamatuar aktiviteler gibi benzersiz özellikleri nedeniyle kozmetik ürünler ve elektronik bileşenler dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda ilgi çekicidir [10]. Nanoteknoloji, tekstil materyallerine işlevsel özellikler kazandırma şeklini devrim niteliğinde değiştirmiş, özelliklerini iyileştirme konusunda yeni olasılıklar açmıştır [11]. Yapılan çalışmalar, nanometre ölçekli materyallerin tekstiller içine entegre edilmesinin giysi renklerini geliştirebileceğini, anti-koku işlevleri sağlayabileceğini, UV koruması sunabileceğini ve insan biyozizlemesini mümkün kılacağı göstermiştir [12].

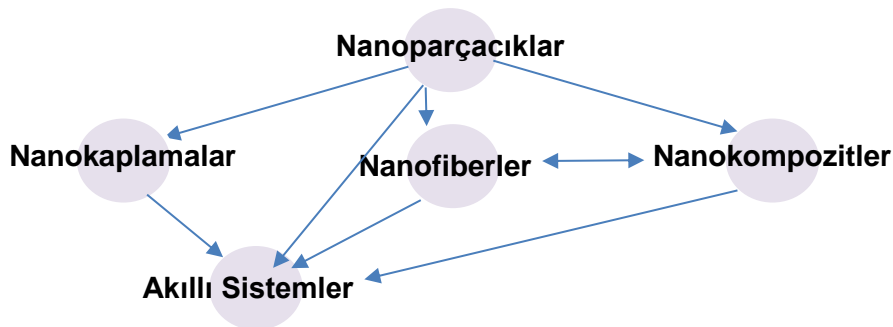
Ayrıca, nanoteknoloji, geleneksel ambalaj malzemelerinin ulaşamadığı işlevleri sunan aktif gıda ambalaj sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır [13]. Tekstillerde nanoteknolojinin uygulanması, esnek, gözenekli ve iletken enerji tekstilleri gibi, tekstil işlevselliğini geliştirme potansiyeli ve çeşitliliğini sergileyen ürünlerin üretilmesinde de kullanılabilir [12]. Tüm bunların ötesinde, tekstillerde nanomalzemelerin sürdürülebilir kullanımı için yapılan araştırmaların tekstil üretiminde nanoteknolojinin faydalarından yararlanılırken çevresel etkilerin göz önünde bulundurulması da önemli bir gerekliliktir [14].

Nanoteknolojinin tekstil alanında uygulamaları (NTAU) geniş bir yelpaze olup bazı uygulamalar birden fazla sınıfa dahil olabilmektedir. Şekil 1'de yapılan sınıflandırma özellikle iplikten başlayarak giyilebilir ürüne doğru giden malzemelerin üretimi göz önüne alındığında nanoteknolojinin uygulamalarını içermektedir. Belirtmek gerekmektedir ki nanoteknolojinin tekstil alanında uygulamalarda kusursuz olması yapılacak bazı geliştirmelerin ve farklı alanlarda bulunan birtakım teknolojilerin bu alana edilmesiyle gerçekleşecektir.



Şekil 1. Nanoteknolojinin tekstil alanındaki uygulamalarının (ntau) sınıflandırılması (Classification of nanotechnology applications in textiles (NTAU))

NTAU, farklı alt sınıfların birbirleriyle etkileşim halinde olduğu karmaşık bir yapıya sahiptir. Nanoparçacıklar, hem nanokompozitlerin bir bileşeni olarak hem de nanokaplamaların yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Ayrıca, nanoparçacıklar nanofiberlerin üretiminde kullanılabilir ve bu şekilde nanofiberlerin özelliklerini iyileştirebilir. Dahası, nanoparçacıklar doğrudan akıllı sistemlerde sensör, aktüatör veya diğer fonksiyonel bileşenler olarak işlev görebilir. Nanofiberler, nanokompozitlerin yapısal bileşenleri olmanın yanı sıra, akıllı sistemlerde sensör veya aktüatör olarak işlev görebilir. Nanokompozitler, nanofiberlerin üretiminde kullanılabilir ve bu şekilde nanofiberlerin özelliklerini iyileştirebilir. Nanokaplamalar, akıllı sistemlerin yüzey işlevselliğini artırarak bu sistemlerin performansını iyileştirir. Nanokompozitler ise akıllı tekstil ürünlerinin dayanıklılığını ve işlevselliğini artırarak bu ürünlerin daha etkin kullanılmasını sağlar. NTAU için varolan etkileşimlerin daha iyi anlaşılması için ilişkiler ağı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. NTAU ilişkilerinin gösterimi (Representation of NTAU Relationships)

### 1.1.1. Nanoparçacıklar (Nanoparticles)

Nanoparçacık, boyutları 1 ila 100 nanometre arasında olan parçacıklara verilen isimdir. Bu parçacıklar, atomlarının dizilimi ve yapıları nedeniyle benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler gösterebilir. Özellikle nanoparçacığın yüksek yüzey alanı ile hacim oranı sağlaması, katalizör, sensör ve filtreleme gibi alanlarda uygulanmasını sağlamıştır [15].

Nanoparçacıklar metaller, seramikler, polimerler ve karbon bazlı malzemelerden üretilebilir. Üretim yöntemleri arasında kimyasal buhar çöktürme, sol-jel işlemi ve fiziksel buhar çöktürme yer almaktadır. Bu malzemelerin tek başına çeşitli uygulamalarda kullanılması dışında çeşitli malzemelere kompozit oluşturacak şekilde katılarak katıldıkları malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla da hizmet edebilmektedirler. Bu şekilde uygulamaları daha da genişler ve tıptan çevre teknolojisine, elektronikten enerji depolama ve dönüşüm sistemlerine kadar uzanır. Tıpta hedefli ilaç salım sistemleri, görüntüleme teknikleri ve kanser tedavisi için kullanılırken, çevre teknolojisinde su arıtma ve hava filtreleme sistemlerinde yer aldıkları gözlenmektedir [16,17].

Tekstilde özellikle apreleme işlemleri kullanılarak, nanoparçacıklar tekstillerle birleştirilmektedir. İletken veya manyetik metaller veya metal oksitlerden oluşan çeşitli nanoparçacıklar, tekstillerin özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [18]. Üstelik bu geliştirme sağlanırken tekstil yüzeyinin temel özelliklerini değiştirmemektedir [19]. Nanoparçacıkların uygulaması yapılan apre için kullanılan malzeme miktarını da azaltmaktadır [20]. Pamuklu kumaş üzerinde antibakteriyel, kolay leke çıkarma ve UV koruma özellikleri kazandırmak amacıyla nanoparçacıkları kumaş yüzeyine yerleştirilmektedir [21]. Plazma / nanopartiküllerin kullanılması sayesinde, tekstil liflerinin birçok özelliğinde büyük iyileşmelerin sağlandığı bir çalışmada bu iyileştirmeler kullanılan plazma ve nanopartikül türlerine bağlı olarak değişmektedir. SEM görüntüleri, kumaşların yüzey özelliklerinin değişirken hacim özelliklerinin değişmeden kaldığını göstermektedir. Uygulamadaki kolaylığı, çevresel



ve enerji tasarrufu avantajlarıyla, plazma/nanopartikül teknolojisinin tekstil sektörüne yüksek performanslı malzemeler geliştirme potansiyeli bulunmaktadır [22]. Nanoparçacıklarla modifiye dokuma tekstiller, boyutlarına ve konsantrasyonlarına bağlı olarak, çözgü ve atkı iplikleri arasında, ipliklerin içine veya selüloz liflerin nano ölçekli aralıklarına depolanabilir veya hapsedilebilmektedir [23]. Yenilikçi nanoparçacıklar, tekstillerde renk ve antimikrobiyal, hidrofilik, kendini temizleyen, ultraviyole (UV) koruması ve alev geciktirici gibi çeşitli fonksiyonel özellikler geliştirmede büyük potansiyel göstermiştir [24]. Antimikrobiyal tekstiller, bakır nanoparçacıkları, bakır oksit parçacıkları, gümüş nanoparçacıkları, titanyum dioksit ve grafen bazlı nanomalzemeler gibi aktif ajanlarla tekstillerin emdirilmesi veya kaplanması yoluyla geliştirilebilmektedir [25]. Ayrıca konjuge polimer nanoparçacıklara dayalı akıllı tekstiller, yapılan çamaşır testlerinden sonra etkili dayanıklılık sergileyerek, pratik uygulanabilirliklerini kanıtlamaktadır [26]. Pamuklu kumaşlarda çinko oksit nanoparçacıklar kullanarak yapılan fonksiyonel apreleme, antimikrobiyal özellikler, su iticilik, toprak direnci, anti-statik özellikler, boyanabilirlik, renk haslığı ve tekstil malzemelerinin dayanıklılık özelliklerini arttırmaktadır [27]. Araştırmacılar tekstil endüstrisinde üretilen geleneksel kumaşların özelliklerini arttırmak için tekstil lifleri üzerine nano boyutlu parçacıkların yerleştirilmesi için yeni teknikler arayışlarındadır [28]. Ayrıca tekstiller üzerine eş zamanlı nanoparçacıklar-biyopolimerlerin yerleştirilmesinin yararları üzerine de çalışılmakta ve antibakteriyel özelliklerin yıkama haslığı, biyoyuyluluk ve uzun süreli antibakteriyel etkilerin öne çıktığı görülmektedir [29]. Metal nanoparçacıklar kullanarak tekstillere antimikrobiyal apreler kazandırmaya odaklanan çalışmalarda, antimikrobiyal özellikler, etki mekanizmaları, toksisite çalışmaları bu yönde incelenmektedir [30].

### 1.1.2. Nanofiberler (Nanofibres)

Nanofiber, çapı nanometre ölçeğinde olan ince liflerdir. Nanolifler olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu lifler, polimer veya seramik gibi çeşitli malzemeler kullanılarak özel üretim teknikleri ile elde edilir. En yaygın nanofiber üretim yöntemi elektro-çekim/elektro-eğirme (electrospinning)'dir [31] ve bu yöntem yüksek voltaj uygulanan bir polimer çözeltisinin ince bir uçtan geçirilerek liflerin çekilmesi olarak tarif edilebilir [32].

Nanofiberlerin yüksek yüzey alanı ve gözenekliliği sayesinde, özellikle filtreleme [33], tıbbi uygulamalar, doku mühendisliği, yara örtüleri [34], sensör teknolojisi ve çeşitli elektroniklerdeki uygulamalarda [35] kullanımları oldukça değerlidir. Örneğin, hava ve su filtrelerinde, nanofiberler zararlı mikroorganizmaları, virüsleri ve diğer kontaminantları etkili bir şekilde süzebilir. Aynı zamanda, hafiflikleri ve yüksek dayanıklılıkları sayesinde savunma ve havacılık sanayinde de tercih edilmektedir [36].

Nanofiber tekstil alanında yapılan çalışmalar, nanoteknoloji ve tekstil endüstrisinin kesişiminde önemli gelişmeleri ortaya koymaktadır. Elektro-eğirme ve nanofiber üretimi konularındaki ilerlemeler, endüstriyel tekstil işlemlerine dair bilgi birikiminin nanofiber oluşturma yöntemlerindeki yeni gelişmelerle birleştiğini göstermektedir [37]. Bu üstün özelliklere sahip lifler yeni nesil tıbbi iplikler ve tekstillerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır [38]. Bu tür nanolifler, tekstil endüstrisindeki geleneksel malzemelerin ötesinde performans ve işlevsellik sunmaktadır. Bu gelişmeler, nanometre ölçeğinde liflerin üretimini ve kullanımını artırarak tekstil endüstrisinde yeni olanaklar sunsa da üretim miktarlarının düşük ve pahalı olmaları bu ileri teknolojik malzemelerin tekstil üzerine kullanılmasından ziyade üstün özelliklerinin kullanılacağı alanlar farklılaşmaktadır.

Nanofiberlerin çok yönlülüğü, filtrasyon, biyomedikal uygulamalar, koruyucu ve fonksiyonel tekstiller gibi çeşitli teknolojik alanlarda kullanılmalarına olanak tanımaktadır [39]. Bu sayede, nanofiberlerin tekstil endüstrisindeki uygulama alanları sürekli genişlemekte ve daha işlevsel tekstil ürünlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Nanofiberler, çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirme potansiyelleri için yoğun olarak incelenmektedir. Neisiany vd. (2017), karbon/epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için işlevselleştirilmiş elektro-eğirilmiş poliakrilonitril nanofiberlerin eklenmesini araştırmıştır [40]. Abe ve Yano (2012), selüloz nanofiber tabanlı hidrojel ve yüksek mekanik dayanıklılıkları üzerine çalışmalar yapmış, nanofiberlerin polimer matrislerini güçlendirmedeki potansiyelini vurgulamıştır [41]. Beachley ve Wen (2009), doku mühendisliği uygulamaları için nanofiber güçlendirilmiş protein yapılarının üretimine odaklanmış, nanofiberlerin doku rejenerasyonunda yapısal destek ve rehberlik sağlama rolünü ön plana çıkarmıştır [42]. Li vd. (2014),

diş kompozitlerinin polimer nanofiberlerle güçlendirilmesini incelerken, nanofiberlerin diş materyallerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için ideal nano dolgu maddeleri olarak potansiyelini ortaya koymaktadır [43]. Merkle vd. (2014), jelatin ve polivinil alkol kullanarak çekirdek-kabuk nanofiberlerin üretimini göstermiş, nanofiber yapılarında mekanik dayanıklılık ve biyoaktiviteyi entegre etmiştir [44]. Ayrıca, Abe vd. (2013), NaOH ile  $\beta$ -kitin nanofiberlerine dayalı sağlam hidrojel yapılarının hazırlanmasını incelerken, nanofiberlerin suda davranışını ve stabil ve sağlam hidrojel yapıları üzerine çalışmıştır [45].

Fiber takviyeli kompozitlerde üretim yöntemleri, numune kalınlığı, çekme hızı gibi faktörlerin Mod I kırılma tokluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir [46]. Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla, seçici lazer ergitme gibi eklemeli imalat yöntemlerinin avantajları bulunmasına rağmen, bazı zorluklarla karşılaşmaktadır [47]. Perovskit üretiminde döndürerek-kaplama (spin-coating), termal buharlaştırma gibi yöntemler sıkça kullanılmaktadır [48]. Üretim yöntemine bağlı olarak malzemenin mikroyapısını etkileyen işlem adımları önemlidir [49].

Üretim yöntemlerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir alanda incelenmektedir. Örneğin, baryum hekzaferrit malzemesinin manyetik özelliklerindeki değişimler farklı üretim yöntemleri kullanılarak incelenmiştir [50]. Ayrıca, implant destekli hibrit protezlerin üretiminde kullanılan materyaller ve yöntemler detaylı bir şekilde incelenmiştir [51]. Otomatik yapı üretim teknolojisinin avantajlarından biri de çeşitli malzemelerin kullanılabilmesidir [52].

Üretim yöntemlerinin sürdürülebilirlik açısından da önemi vardır. Fiber takviyeli polimerlerin kullanımı, daha sürdürülebilir ve yenilenebilir yapılar oluşturmaya katkı sağlayabilir [53]. Ayrıca, hidrojen üretim teknolojileri de sürdürülebilirlik açısından ele alınmaktadır [54].

### 1.1.3. Nanokaplamalar (Nanocoatings)

Nanokaplama, yüzeylerin nanometre boyutunda ince bir tabaka ile kaplanması işlemidir. Bu kaplama, genellikle metal, seramik veya plastik gibi malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığını artırmak, sürtünme direncini azaltmak, korozyon önlemek veya özel optik özellikler sağlamak amacıyla uygulanır [55]. Nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanlarının gelişimiyle birlikte nanokaplama teknikleri de daha yaygın hale gelmiştir. Bu teknikler arasında buhar biriktirme, plazma destekli teknikler, kimyasal indirgeme ve kendiliğinden birleşme gibi yöntemler bulunmaktadır [56].

Literatürdeki son çalışmalar incelendiğinde, nanokaplamaların, antimikrobiyal özellikler ve emülsiyon sistemindeki stabilite sağlamak amacıyla *Porang (Amorphophallus muelleri)* raf ömrünü uzatmak için [57], fotovoltaik panellerin kendiliğinden temizlenme ve hidrofobik özellik sağlamak amacıyla [58], implantlar ve tıbbi cihazlarda biyouyumluluğun artırılması böylelikle implantın kemikle bütünleşme ve vücuda güçlü ve kalıcı bir şekilde entegre olması sürecini ve uzun vadeli klinik sonuçları iyileştirme amacıyla [59,60], enerji verimli binalarda sıcaklık kontrolü sağlamak ve anti-grafiti kaplamalar üretmek amacıyla [61] ve kendi kendini onarma amacıyla [62] çeşitli alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Nanokaplamaların akıllı kumaşlar içindeki uygulamalarına bakıldığında, sol-jel teknikleri kullanılarak elde edilen nanokaplamalar, kumaşların yüzeyini pürüzsüzleştirerek suyun kumaş yüzeyine yapışmasını engellerken, sentetik kumaşların statik elektriği toplamasını önlemek için elde edilen nanokaplamalar kumaşa anti-statik özellikler katmakta, UV ışınlarını bloke edebilen çeşitli nanopartiküller güneş dayanımını arttırmakta ve metal nanopartikülleri kullanılan nanokaplamalar ile antibakteriyel özellikler mümkün olmaktadır [63,64].

### 1.1.4. Nanokompozitler (Nanocomposites)

Nanokompozitler, tekstil endüstrisine çeşitli işlevsellikler ve özellikler sunarak önemli bir etki yapmıştır. Polimer nanokompozitler, tekstiller için yenilikçi nano-bitirme malzemelerinin geliştirilmesine öncülük ederek, geleneksel kompozit malzemelerden ayrı benzersiz yapı-özellik ilişkilerine sahip farklı bir malzeme sınıfı yaratmıştır [65,66]. Bu nanokompozitler, tekstillerin çok işlevli bitirilmesi için etkin bir şekilde kullanılmış olup, artırılmış mekanik dayanıklılık, alev geciktiricilik, radyasyon koruması ve iyileştirilmiş dayanıklılık gibi avantajlar sağlamıştır [67,68]. Nanomalzemelerin kumaşlara entegrasyonu yaygın bir uygulama haline gelmiş olup, nanokompozit lifler, kaplamalar ve zeki polimerik nanokaplamalar, performansı artırmak ve yeni işlevler kazandırmak amacıyla tekstil ürünlerine dahil edilmektedir. Metalden nanopartiküllere, karbon

nanotüplere ve grafenlere kadar çeşitli nanomalzemeler, insan cildine rahatça yapıştırılabilen veya tekstillerle bütünleştirilerek fizyolojik parametreleri veya çevresel koşulları izleyebilen yüksek hassasiyetli giyilebilir sensörlerin geliştirilmesini sağlamıştır [69]. Nanokompozitler, fototermal ve antibakteriyel aktiviteler gibi özellikler içeren akıllı tekstillerin ilerlemesinde kritik bir rol oynamış, bu gelişmiş malzemelerin tekstil uygulamalarındaki çok yönlülüğünü ve potansiyelini vurgulamıştır [26]. Ayrıca, nanokompozitlerin yara örtüleri, temiz su üretimi ve antimikrobiyal özellikler gibi uygulamalar için tekstil kumaşlarında kullanılması, nanokompozitlerin çeşitli sektörlerdeki farklı zorlukları ele almadaki çeşitli ve etkili rollerini [70-72]. Genel olarak, nanokompozitler, tekstil teknolojisindeki ilerlemeye önemli katkılarda bulunmuş, tekstil malzemelerinde işlevsellik, sürdürülebilirlik ve performans için çözümler sunmuştur.

#### 1.1.5. Akıllı tekstiller (Smart textiles)

Akıllı tekstil, gelişmiş teknoloji ile donatılarak kullanıcıya çeşitli işlevler sağlayabilen kumaşlar olarak tanımlanabilir. Giysilere entegre edilmiş sensörler, aktüatörler ve kontrol mekanizmaları sayesinde çevresel değişikliklere tepki verebilir, kullanıcıların sağlık durumunu izleyebilir veya rahatlık ve performansı artırabilir. Akıllı tekstiller, gelişmekte olan bir alan olarak, etkileşimli ve duyarlı yeteneklere sahip çeşitli tekstil malzemelerini kapsar. Bu tekstiller, performans özelliklerine bağlı olarak pasif akıllı tekstiller, aktif akıllı tekstiller ve ultra akıllı tekstiller olarak sınıflandırılmıştır [73].

Pasif akıllı tekstiller, belirli uyarıcılara (sıcaklık, ışık, basınç gibi) tepki veren ancak bu verileri işlemeyen veya analiz etmeyen kumaşlardır. Bu akıllı tekstillerin ilk nesli olarak kabul edilebilir ve giyen kişinin sağlığı veya çevre ile ilgili olarak çevresel koşullardaki değişiklikleri yalnızca algılamak ve izlemekle sınırlıdır. Dış değişiklikleri tespit etmek için bir sensör olarak işlev görürler; örneğin, yalıtım özelliklerine sahip montlar, dış sıcaklığın ne olduğuna bakılmaksızın aynı tepkiyi gösterir. Bu kategorideki tekstiller, anti-bakteriyel aktivite, anti-statik özellikler, UV koruması, alev geciktiricilik gibi çeşitli işlevler sunar [64].

Aktif akıllı tekstiller ise dış çevredeki değişiklikleri veya uyarıları algılamakla kalmaz, aynı zamanda çevreyle dinamik bir etkileşim içerisine girer ve ona aktif olarak tepki verebilir. Bu gelişmiş tekstiller, dış uyarıcılardaki modülasyona göre fonksiyonlarını otomatik olarak ayarlayarak çevresel değişikliklere adapte olurlar. Sensörler, mikroelektronik ve aktüatörler içeren bu tekstiller, çevresel değişiklikleri algılayabilir ve bu verileri kullanarak dinamik bir tepki verebilirler [64]. Örneğin, sıcaklık değişikliğine bağlı olarak ısıtma veya soğutma özelliği aktif hale gelebilir. Bu adaptasyon yeteneği, onların sadece hassas olmalarının ötesinde, aktif bir şekilde tepki verebilir bir aktüatör olarak da işlev görmelerini sağlar. Su geçirmez ve nem geçirgen kumaşlar (nefes alabilen kumaşlar), şekil hafızalı malzemeler, termal regülasyon sağlayan tekstiller gibi özelliklere sahip bu tekstiller, kullanıcıların konfor ve ihtiyaçlarına göre kendilerini ayarlayabilir. Bu özellikler, tekstillerin daha işlevsel ve kullanıcı dostu hale gelmesini sağlar, böylece günlük yaşamda pratiklikleri ve etkinlikleri artar.

Ultra akıllı tekstiller ise her zaman bir seçeneğe sahip şekilde dizayn edildiğinden çevresel uyarıcılara en iyi şekilde nasıl uyum sağlayacaklarına da karar verir. Dışarıdaki sıcaklığı algıladıktan sonra vücut sıcaklığını ısıtma veya soğutma yoluyla değiştirebilmek gibi karar bu tip tekstillere örnek olarak verilebilir. Son zamanlarda, bu tekstillerin üretimi, kimya, fizik, mekanik, elektronik, biyoloji gibi geleneksel tekstil teknolojisi ile çok disiplinli bilim dalları arasındaki başarılı ilişki sayesinde hızla artmıştır [64].

Akıllı tekstiller, spor ve sağlık izleme, askeri ve savunma, gelişmiş giyilebilir teknoloji ve günlük giyimde kullanılabilir. Akıllı tekstiller, kullanıcı deneyimini ve konforunu artırmak için tasarlanmış, çok işlevli ve etkileşimli giysiler sunmaktadır.

Çevre ve kullanıcılarla etkileşim kuracak şekilde tasarlanmışlardır, uyarıcılara duyarlılık göstermeleri, onlara tepki vermeleri ve tekstil yapısına işlevler entegre ederek uyum sağlamaları mümkündür [74,75]. Akıllı tekstiller, tıbbi tekstiller, koruyucu giysiler, dokunmatik ekranlar ve sensörler gibi çeşitli ürünlerin gelişiminde kritik bir rol oynayan iletken polimerlerin entegrasyonu ile daha da geliştirilebilir [76].

Elektroniklerin tekstillerle entegrasyonu, çevresel uyarıcılara duyarlılık ve tepki verebilme yeteneğine sahip elektronik tekstiller veya e-tekstillerin ortaya çıkmasına yol açmıştır [77]. Bu e-tekstiller sağlık,

wellness, spor ve hatta uzay keşfi gibi çeşitli sektörlerde uygulamalar bulmuştur [78]. Ayrıca, nanoteknolojideki ilerlemeler, mobil bağlantı, MP3 çalarlar ve navigasyon sistemleri gibi işlevlerle donatılmış akıllı giyilebilir tekstillerin geliştirilmesini sağlamıştır [79].

Bazı çalışmalarda, PANI/poliakrilonitril (PAN) nanolifler, gümüş nanopartikülleri, tek/çok duvarlı-nano karbon tüpler (SWCNT/MWCNT), Ag, Au ve Cu nanopartikülleri, esnek tekstiller, giyilebilir güneş tekstilleri, triboelektrik nanogeneratorlar ve tek parça halinde kendinden güç üreten veya şarj olabilen akıllı ve giyilebilir tekstillerde kullanılabilmiştir [79].

Akıllı tekstillerin sürdürülebilirliği bir soru işareti oluşturmakta, üretim teknolojilerinde, malzemelerde ve araştırma ve geliştirmede iyileştirmeler yapılmasını gerektirmektedir. Bu sayede rekabetçi ve çevre dostu olmaları sağlanacaktır [80]. Ayrıca, akıllı tekstillerin geliştirilmesi, tekstil fabrikasyon yöntemleri, sensör entegrasyonu ve ticari bileşenlerin tekstil mimarilerine entegrasyonu ile ilgili zorluklar ile birlikte fırsatlar da sunmaktadır [81].

Çalışmalar incelendiğinde nanoteknolojinin tekstilde özelliklerin birden fazlası üzerinde etkileri olmaktadır. Bu nedenle anlatım içerisinde sınıflandırılma yapılmış olsa da literatürdeki çalışmalarda geliştirmelerin etkilerinin iç içe geçtiği görülecektir.

## 2. Geliştirilmiş Kumaş Özellikleri (Enhanced Fabric Properties)

### 2.1. Dayanıklılık ve güç (Durability and strength)

Nano teknolojik işlem görmüş tekstiller, geleneksel malzemeleri aşan olağanüstü bir dayanıklılık ve çekme mukavemeti sergiler. Karbon nanotüpler veya grafen gibi nanopartiküller liflere gömülerek, onları inanılmaz derecede güçlü ancak hafif hale getirebilir. Bu ilerleme, inşaat ve spor gibi endüstriler için koruyucu giysilerin ve ekipmanların üretiminde özellikle yararlıdır [63]. Tablo 1'de tekstilde dayanım arttırmaya yönelik nanoteknolojik uygulamaları özetlemektedir.

### 2.2. Su iticilik, lekeden korunma ve kendini temizleme (Water repellency, stain protection, and self-cleaning)

Nanoteknoloji, süperhidrofobik malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Tekstillerin yüzey yapısını, su ve lekeleri iten kumaşlar yaratarak, giysinin ömrünü uzatır ve temizleme gereksinimlerini azaltır [86].

Titanyum dioksit gibi fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküller kullanılarak, kendini temizleyen kumaşlar organik bileşikler ve kirleticileri ışığa maruz kaldıklarında parçalayabilir. Bu özellik, özellikle hijyenin önemli olduğu tıbbi giysi ve spor giyim gibi uygulamalar için caziptir.

Tablo 1. Tekstilde dayanıklılık amaçlı nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for durability in textiles)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Mikro seviyede dokunmuş penetrasyon engelleyici kumaş üretimi	Nanolifler	[82]
Yüksek performanslı tekstillerin geliştirilmesi	Yenilikçi nanomalzemeler	[2]
Tekstilde giyim konforu	$\beta$ -Siklodekstrin/Polyakrilonitril	[83]
Antistatik tekstil	Karbon siyahı/Polypropylene/polyamide (Naylon)	[84]
Yangın geçirmez tekstil	Nano-kaolinit	[85]
Tekstillerin estetik ve fonksiyonel iyileştirmesi	Estetik cazibe ve esneklik sağlayan nanomalzemeler	[4]
Yenilikçi tekstil işlevleri: leke direnci, alev geciktiricilik, kırışıklık direnci	Geliştirilmiş işlevselliğe sahip nanomalzemeler	[1]
İşlevsel tekstil malzemelerinin geliştirilmesi	Performansı artırılmış nanomalzemeler	[5]

Fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküller, özellikle titanyum dioksit, tekstillerle entegre edilerek işlevselliği artırılmış kendini temizleyen kumaşların oluşturulmasına yol açmıştır. Titanyum dioksit nanopartikülleri, pamuk ürünleri gibi tekstillerde olağanüstü fotokatalitik aktivite sergileyerek, kendini temizleme özellikleri sağlar [87]. Tekstil materyallerinin nano yapılar ile fonksiyonelleştirilmesi, fotokatalitik kendini temizleme, antimikrobiyal koruma, UV ışığından korunma, alev geciktiricilik ve nem yönetimi dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için faydalı olmuştur [88]. Yapılan çalışmalar, TiO<sub>2</sub> kaplı pamuk tekstillerinin önemli ölçüde kendini temizleme özelliklerine sahip olduğunu, bakterisidal aktivite ve kırmızı şarap ile kahve gibi lekelerin ayrıştırılmasını içerdiğini göstermiştir [89].

Titanyum dioksit nanopartiküllerinin tekstiller içine dahil edilmesi, antibakteriyel özellikleri artırdığı ve kendini temizleme işlevlerini başardığı gösterilmiştir [90]. Araştırmalar, ZnO nanopartiküllerini yün ve poliakrilonitril lifler üzerine yerleştirerek kendini temizleyen polimerik liflerin başarılı bir şekilde hazırlanmasını ve önemli fotokatalitik kendini temizleme aktivitesini sergilediğini vurgulamıştır [91]. Ayrıca, TiO<sub>2</sub> nanopartikülleri temelinde yüksek şeffaflığa sahip kendini temizleyen filmlerin sentezi başarılı, ileri fotokatalitik özellikler sunulmuştur [92].

Bununla birlikte, fluoropolimer ve silika nanopartikülleri kullanılarak geliştirilen süperhidrofobik pamuk kumaşın, kendini temizleme özellikleri ile çok amaçlı uygulamalar sunduğu gösterilmiştir [86]. Pamuk kumaş üzerine BiOCl/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> fotokatalizörünün uygulanması, kendini temizleme, UV koruması ve fotokatalitik özellikler gibi işlevlerin geliştirilmesi konusunda umut vaat etmiştir [93]. TiO<sub>2</sub> nanotüpleri içeren hibrit membranlar, mükemmel fotokatalitik aktivite sergileyerek, kendini temizleme ve anti-fouling özelliklerini maksimize etmek için tasarlanmıştır.

Sonuç itibarıyla, özellikle titanyum dioksit olmak üzere fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküllerin tekstil sektöründe kullanılması, kendini temizleyen ve işlevselliği artırılmış kumaşlar yaratma konusunda bir devrim yaratmış ve tekstil ürünlerinin temizliği, dayanıklılığı ve performansı gibi alanlarda yenilikçi çözümler sunmuştur. Bu durum, özellikle hijyen ve işlevsellik açısından önem taşıyan sektörler için büyük önem arz etmektedir. Tablo 2, su iticilik, lekeden korunma ve kendini temizleme uygulamaları için bir özet sunmaktadır.

Tablo 2. Tekstilde su iticilik, lekeden Korunma ve kendini Temizleme için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for water repellency, stain resistance, and self-cleaning in textiles)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Kendini temizleyen tekstil	TiO <sub>2</sub> / Pamuk - Au-TiO <sub>2</sub> film / Pamuk	[94,95]
Yağ-su arayüzlerinde emilmiş	SiO <sub>2</sub> nanopartikülleri	[96]
Yağ iticilik	Perflorostilatlanmış dördüncül amonyum silan/SiO <sub>2</sub>	[97]
Su itici tekstiller	SiO <sub>2</sub>	[98]
Hidrofobik ve ısı yalıtımlı tekstiller	Silika aerogel	[99]
Süperhidrofobik pamuk kumaş geliştirilmesi	Fluoropolimer ve silika nanopartikülleri	[100]
Antibakteriyel ve antiviral özelliklerin sağlanması	Gümüş nanopartikülleri	[10]
Antimikrobiyal, anti-kirlenme	Gümüş NP / Pamuk	[101]
Çinko oksit nanopartikülleri ile kendini temizleyen ve antimikrobiyal özellikler kazandırılması	ZnO nanopartikülleri/PDMS kompoziti ile modifiye edilmiş polyester	[102]
Biyouyumlu ve antimikrobiyal kumaşlar	ZnO-Gallic Acid / Pamuk	[103]

### 2.3. UV koruma (UV protection)

Titanyum dioksit veya çinko oksit gibi nanopartiküller, zararlı ultraviyole (UV) ışınlarını bloke edecek şekilde kumaşlara entegre edilebilir. Bu uygulama, özellikle dış giyimde değerlidir ve kumaşın nefes alabilirliği ve konforunu korurken güneş hasarına karşı gelişmiş koruma sunmaktadır.

Tekstiller, UV blokaj ajanlarının tekstil matrisine entegre edilmesiyle UV koruyucu özelliklerle geliştirilebilir [104]. Ayrıca, araştırmalar, korona deşarj/hava RF plazması ve koloidal TiO<sub>2</sub> nanopartikülleri ile modifiye edilmiş polyester kumaşların, uzun süreli dayanıklılık ile antibakteriyel aktivite, UV koruması ve kendini temizleme etkileri gibi çok fonksiyonlu özellikler sunabileceğini göstermiştir [105]. Dahası, Polyester tekstiller üzerine çinko oksit nanopartikülleri/Polidimetilsiloksan (ZnO/PDMS) kompoziti entegrasyonu, UV ışığı altında çinko oksit nanopartiküllerinin antibakteriyel ve fotokatalitik etkileri nedeniyle birden fazla kendini temizleme özelliği sağlayabilir [102]. Tablo 3'te özellikle UV koruma elde etme amacıyla gerçekleştirilen bazı nanoteknolojik uygulamalar verilmektedir. Bununla birlikte UV koruma ile başka özelliklerin elde edilmesinde de başarılı olduğu incelenen tablo ile anlaşılmaktadır.



Tablo 3. Geliştirilmiş kumaş özellikleri için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for enhanced fabric properties)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
BiOCl/Bi <sub>2</sub> WO <sub>6</sub> fotokatalizörü ile işlevselliğin artırılması	BiOCl/Bi <sub>2</sub> WO <sub>6</sub> fotokatalizörü	[86]
Fotokatalitik özelliklere sahip kendini temizleyen kumaşlar	TiO <sub>2</sub> nanopartikülleri	[87,89,90,92,106]
UV Koruyucu giysiler	PANI/TiO <sub>2</sub>	[107]
UV Koruyucu giysiler	Poliüretan bazlı MnO <sub>2</sub> -FeTiO <sub>3</sub>	[108]
Kumaşların UV koruması için nanopartiküllerin entegrasyonu	Titanyum dioksit ve çinko oksit nanopartikülleri	[104]
Polyester kumaşların çok fonksiyonlu özellikler kazanması: antibakteriyel, UV koruması, kendini temizleme	Koronadeşarj/hava RF plazması işlenmiş ve TiO <sub>2</sub> nanopartikülleri ile modifiye edilmiş polyester	[105]

### 3. Akıllı ve Fonksiyonel Tekstiller (Smart and Functional Textiles)

#### 3.1. Termal düzenleme (UV protection)

Nanometre ölçeğinde faz değişim malzemeleri (PCM'ler) entegre ederek, tekstiller ısının emilmesini, depolanmasını ve salınmasını düzenleyebilir. Bu teknoloji, çeşitli çevresel koşullarda optimal vücut sıcaklığını korumak için spor giyim ve dış giyimde kullanılır. Akıllı ve fonksiyonel tekstillerin üretimindeki bazı çalışmalar Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Akıllı ve fonksiyonel tekstil üretimindeki bazı nanoteknoloji uygulamaları (Selected nanotechnology applications in smart and functional textile production)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Biyomedikal ve algılama teknolojisinde nanoteknoloji kullanımı	Biyomedikal sensörler ve algılayıcılar	[7,8]
Elektrik iletkenliği ve statik yük dağıtımının iyileştirilmesi	TiO <sub>2</sub> ve ZnO nanopartikülleri	[9]
Faz değişim malzemeleri ile termal konforun artırılması ve enerji verimliliği	PCM'lerin nanometre ölçeğinde tekstiller içine entegrasyonu	[109,110]
Form-stabil PCM'lerin ısı talebi ve arzını düzenlemesi	Form-stabil PCM'ler	[111]
Akıllı termal performans ve çeşitli sektörlerde PCM entegrasyonu	PCM mikrokapsüller ve termal olarak iletken katkı maddeleri	[112-115]
Tekstil bitirme	Aminoalkiltrialkoxysilanes	[116]
Tekstilde enerji depolama	Mn@ZnO/CNF	[117]
Tekstilde giyilebilir elektronik cihazlar	Grafen oksit	[118]
Tekstilde enerji depolama	PPy@MnO <sub>2</sub> @rGO@iletken İplikler	[119]
Enerji depolayan kendi kendini iyileştiren tekstil lifleri	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /PPy	[120]
Tekstilde enerji depolama	Al-NaOCl galvanik hücreler	[121]
Tekstilde esnek enerji depolama lifleri	LiFePO <sub>4</sub> (katot)/Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>10</sub> (anot)/katı polyethylene oksit (elektrolit)/PVDF	[122]
Tekstilde aydınlatma etkisi	Polyurethane/poly(vinyl alkol) (PVA) katmanları	[123]
Giysi tipi ekranlar	Poly-vinyl alkol/SU-8 (düzleştirme katmanı)/Si-baz elastomerik (gerilim tamponu)	[124]
Tekstilde baskılı holografi	Au nanopartiküller	[125]
Floresan süperkapasitör lifler	MWCNT/Fluorescent boyalar	[126]
Akıllı kıyafetler, tabela ve sanat	Polimer fotonik bant aralığı (PBG) lifler	[127]
Tekstiller için esnek optik fiberler bazında basınç sensörü	Geniomer 200 (polisiloksan-üre-kopolimer ile bir polisiloksan)	[128]
Sürdürülebilir giyilebilir veya taşınabilir elektronikler ve akıllı sensör ağları	PTFE/Cu film	[129]
Araç, bina, dalgalar, rüzgar, yürüme vb. vibrasyon enerjisinin toplanması ve algılanması	Akrilik levhalar/yay/Silikon/Karbon nanofiber	[130]
Kendi gücüyle çalışan mekanosensasyon sistem	Bi1+xSmxFe1+xTixO3 /Selüloz	[131]
Titreşim sensörü/hava durumu sensörü	Poli(vinilidenflorür-ko-trifloroetilen) (P(VDF-TrFE)	[132]
Vücuttaki glukoz enerjisinin toplanması	MWCNT/PEDOT/Glukoz oksidaz	[133]
Vücuttaki glukoz enerjisinin toplanması/Algılama	Poli(etilenimin)/(tetraoktilamonyum bromür-stabilize edilmiş Au nanopartikül (TOA-Au NP)/tris-(2-aminoetil)amin (TREN))n, m-GOx: GOx/tris-(2-aminoetil)amin (TREN)m	[134]

Nanoteknoloji, PCM'ler tekstiller içine nanometre ölçeğinde entegre edilmesini kolaylaştırmış, böylece ısı emilimi, depolanması ve salınımının düzenlenmesini sağlamıştır. Bu teknoloji, çeşitli çevresel koşullar altında optimal vücut sıcaklığının korunmasına yardımcı olmak için spor giyim ve dış giyimde kullanılmıştır. PCM'lerin tekstiller içine dahil edilmesi, bu malzemelerin ısıyı etkili bir şekilde yönetmesini sağlayarak, çeşitli ortamlarda termal konfor sağlamakta ve performansı artırmaktadır.

Araştırmalar, PCM'lerin özellikle yüksek gizli ısı kapasitesi ve minimal sıcaklık değişimleriyle faz geçişleri gerçekleştirme yetenekleri nedeniyle enerji yönetiminde, özellikle de güneş enerjisi kullanımında önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir [109]. PCM'lerle donatılmış tekstiller, gizli ısıyı emerek ve salarak enerji arzı ve talebi arasındaki boşluğu kapatmaya yardımcı olabilir, böylece termal düzenlemenin iyileştirilmesine katkıda bulunur [110]. Ayrıca, form-stabil PCM'lerin ısı talebi ve arzını etkin bir şekilde düzenleme konusunda umut vaat ettiği görülmüş, ancak substratlara yapışma ve rijitlik gibi zorluklar devam etmektedir [111].

Çalışmalar, akıllı termal performansları ve giyim, yatak takımları ve otomotiv iç mekanları dahil olmak üzere çeşitli sektörlerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle PCM'lerle entegre edilmiş tekstillerdeki artan ilgiyi vurgulamaktadır [112]. Kumaşlarda PCM mikrokapsüllerin kullanımı, dinamik ısı yönetimi yetenekleri sunarak termoregülasyon özelliklerini geliştirmek için araştırılmıştır [113]. Ayrıca, PCM mikrokapsüllerin termal olarak iletken katkı maddeleri ile modifikasyonu, tekstillerin termal performansını artırarak konfor ve işlevselliği geliştirmek için incelenmiştir [114].

Sonuç olarak, PCM'lerin tekstillerde nanometre ölçeğinde entegrasyonu, özellikle spor giyim ve dış giyim uygulamalarında termal düzenleme teknolojisinde önemli bir ilerleme temsil etmektedir. Nanoteknoloji kullanılarak PCM'lerin kumaşlara entegre edilmesiyle, bu malzemeler ısıyı etkili bir şekilde yönetebilir ve giyen kişilere çeşitli çevresel koşullarda artırılmış konfor ve performans sağlayabilir.

### 3.2. Sağlık ve Wellness izleme (Health and wellness monitoring)

Nanoteknoloji, tekstillerin içine sensörler ve elektronik bileşenlerin entegrasyonunu kolaylaştırarak, kalp atış hızı, sıcaklık ve kas aktivitesi gibi fizyolojik parametreleri izleyebilen akıllı tekstiller oluşturulmasına imkan sağlar. Bu yenilikler, hasta izleme ve rehabilitasyon dahil sağlık uygulamaları için umut vaat etmektedir. Tablo 5, sağlık alanında kullanılarak tekstillerin üretimi için literatürdeki bazı uygulamaları özetlemektedir.

Tablo 5. Sağlık alanında kullanılacak tekstil özellikleri için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for textile features used in healthcare)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Sağlık, ilaç, moda, spor, askeri uygulamalarda akıllı tekstiller	Çok fonksiyonlu nanomalzemeler	[3]
Nanotıp bazında ilaç salımı	NanoTiO <sub>2</sub> @DNA	[135]
Doku mühendisliği; giyilebilir veya implant edilebilir tıbbi cihazlar ve robotlar	Polilaktik asit/polidimetilsiloksan (PDMS)	[136]

### 4. Çevresel Etki ve Sürdürülebilirlik (Environmental Impact and Sustainability)

Nanoteknoloji tekstilleri, daha etkili boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesiyle tekstil endüstrisinde su ve kimyasal kullanımını azaltabilir. Ancak, bu teknolojilerin sürdürülebilirliği, potansiyel çevresel ve sağlık risklerini en aza indirmek için nanopartiküllerin güvenli üretimi, kullanımı ve imhasına bağlıdır.

Tekstillerde nanoteknoloji kullanımı, daha verimli boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesiyle tekstil endüstrisinde su ve kimyasal kullanımını azaltma fırsatı sunmaktadır. Titanyum dioksit gibi benzersiz özelliklere sahip nanopartiküllerin tekstiller içine dahil edilmesi, ışığa maruz kaldığında organik bileşikler ve kirleticileri parçalayan kendini temizleyen kumaşların yaratılmasına yol açabilir. Bu özellik, özellikle hijyenin kritik olduğu tıbbi giysiler ve spor kıyafetleri gibi uygulamalar için avantajlıdır.

Bu teknolojilerin sürdürülebilirliğini sağlamak için, potansiyel çevresel ve sağlık risklerini en aza indirmek üzere nanopartiküllerin güvenli üretimi, kullanımı ve imhasının ele alınması hayati önem taşımaktadır. Tekstil boyası ile kirlenmiş atık suyun çevre dostu yöntemlerle işlenmesi, beyaz çürük

mantarları ve ligninolitik enzimlerin etkin boya bozunumu için kullanılması gibi sürdürülebilir uygulamalar, tekstil endüstrisinde sürdürülebilir uygulamalara katkıda bulunabilir [137]. Ayrıca, elektron ışını ile radyasyon, süperkritik sıvı boyama ve susuz boyama teknikleri gibi yenilikçi yöntemler kullanılarak yeşil boyama işlemlerinin keşfi, tekstil üretiminde su tüketimini ve kimyasal kullanımını önemli ölçüde azaltabilir [14,138,139].

Tekstil boyama süreçlerinin sürdürülebilirliğine yönelik çabalar, tekstil atık suyundan kaynakların geri kazanım stratejilerinin geliştirilmesini de içermektedir. Boya/tuz fraksiyonlaması için ultrafiltrasyon teknikleri, boyaların biyokömür yardımıyla renksizleştirilmesi ve atık sudan boyaların giderilmesi için nanomalzemelerin kullanımı gibi teknikler, çevresel etkiyi en aza indirebilir ve tekstil endüstrisinde sürdürülebilir uygulamaları teşvik edebilir [140-142]. Ayrıca, bitki kabuk ekstraktları kullanarak kumaş boyama veya ağaç boyayan mantarların pigmentlerini tekstil boyaları için çıkarma gibi doğal boyama yöntemlerini keşfetmek, sürdürülebilir ve çevre dostu tekstil üretimine yönelik eğilimle uyumludur [143,144].

Sonuç olarak, tekstillerde nanoteknolojinin entegrasyonu, yenilikçi boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesi yoluyla endüstriyi dönüştürme konusunda değerli bir fırsat sunmaktadır. Çevre dostu boyama tekniklerini kullanma, etkili atık su arıtma yöntemleri uygulama ve doğal boya kaynaklarını keşfetme gibi sürdürülebilir uygulamaları benimseyerek, tekstil endüstrisi daha çevre bilinçli ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerleyebilir. Tablo 6, çevresel etki ve sürdürülebilirlik için yapılan çalışmaların bazılarını vermektedir.

Tablo 6. Çevresel etki ve sürdürülebilirlik için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for environmental impact and sustainability)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Çevresel etki ve sürdürülebilirlik üzerine odaklanma	Çeşitli nanomalzemeler ve sürdürülebilir teknolojiler	[14]
Tekstil üretiminde su ve kimyasal tüketiminin azaltılması ve çevre dostu boyama işlemleri	Sürdürülebilir ve çevre dostu nanoteknoloji uygulamaları	[14,137]
Dayanıklı ve çevre dostu tekstillerin üretimi	Çevre dostu nanoteknoloji malzemeleri	[6]
Tekstil boyama	Kopolimer-SiO <sub>2</sub> nanocomposite / Polyester kumaş	[145]

## 5. Zorluklar ve Geleceğe Bakış (Challenges and Future Outlook)

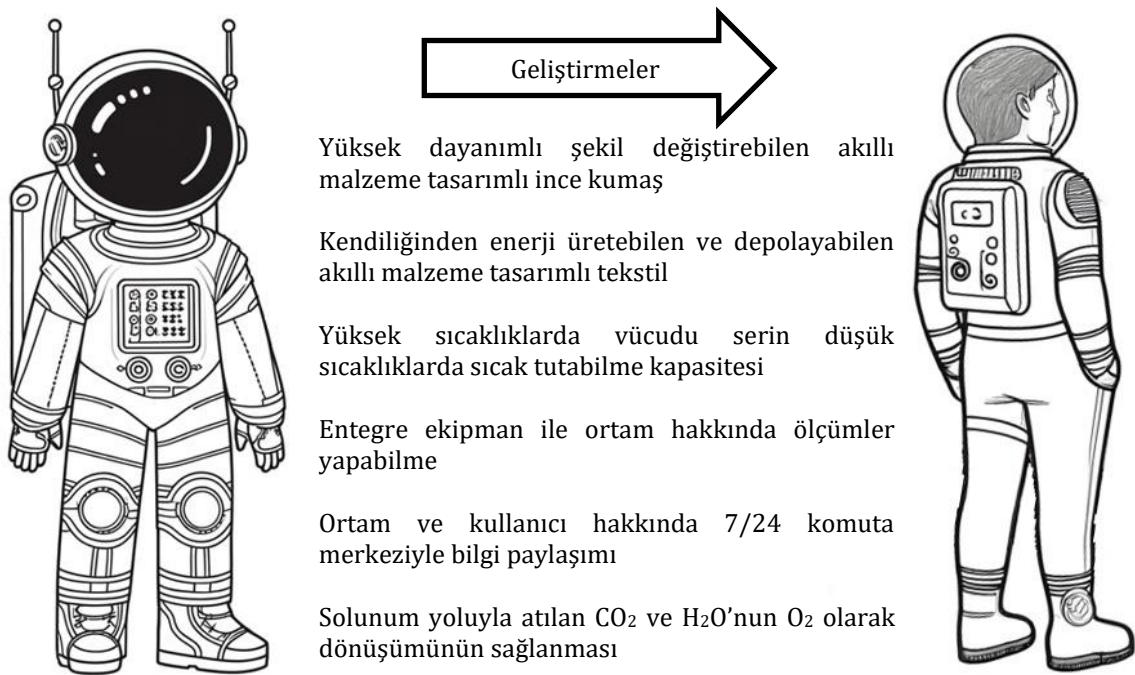
Nanoteknoloji, tekstil endüstrisi için dönüştürücü bir potansiyel sunuyor olsa da, maliyet, ölçeklenebilirlik ve düzenleyici uyum açısından zorluklar mevcuttur. Devam eden araştırmalar, bu engellerin üstesinden gelmeyi amaçlamakta, tekstillerin sadece daha işlevsel olmasını değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve refah katkısında da bulunmasını vaat etmektedir. Malzemeleri nanometre düzeyinde çeşitli şekillerde manipüle etmesi sayesinde, nanoteknoloji tekstil endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde devrim yaratmıştır. Ütopik olarak görülen uzun süreli uzay görevlerinde ya da koloni yaşamında özel tekstil ürünleri gerekecektir ve bu malzemelerin üretilmesinde nanoteknolojinin önemli bir rol üstleneceği de ortadadır. Bu bağlamda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bilim insanlarının beklentisi, nanoteknolojinin tekstile entegrasyonunun devam edeceği ve akıllı tekstillerin geliştirileceği yönündedir.

Gelecekteki çalışmalar, nanoteknoloji ve tekstil malzemeleri arasındaki etkileşimlerin daha derinlemesine anlaşılmasını ve nanomalzemelerin uzun vadeli etkilerinin incelenmesini hedeflemektedir. Özellikle, nanoteknolojinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası olumsuz etkilerinin minimize edilmesi, araştırmaların önemli bir odak noktası olacaktır. Bu bağlamda, biyobozunur nanomalzemeler ve geri dönüştürülebilir nanokompozitlerin geliştirilmesi, tekstil endüstrisinin daha sürdürülebilir bir geleceğe yönelmesinde kritik bir rol oynayacaktır. Ancak bu teknolojilerin ölçeklenebilirlik ve ekonomik fizibilite gibi sınırlamaları, endüstriyel uygulamalara tam anlamıyla entegrasyonunu zorlaştırabilir. Ayrıca, düzenleyici çerçevelerin hızla gelişen bu teknolojiye uyum sağlaması gereklidir. Böylelikle yasal düzenlemelerin bilimsel ilerlemelerle paralel ilerlemesi sağlanabilecektir. Tüm bu unsurlar göz önüne alındığında, nanoteknolojinin tekstil endüstrisinde tam potansiyeline ulaşması için disiplinler arası işbirliklerinin ve uzun vadeli araştırma yatırımlarının artırılması kaçınılmazdır. Tekstillerle modifiye edilecek bir atmosfer dışı görev elbisesinin gelecekteki olası kabiliyetleri Şekil 3'te paylaşılmaktadır. Yapılması muhtemel geliştirmeler, nanoteknolojinin sunduğu yeniliklerle paralellik göstermektedir. Özellikle yüksek dayanımlı, şekil değiştirebilen ve ince kumaşlarla tasarlanan akıllı malzemeler, astronotların hareket kabiliyetini artırırken, bu malzemelerin

aynı zamanda enerji üretip depolayabilmesi, uzun süreli görevlerde kritik bir avantaj sunacaktır.

Bu elbiselerin vücut sıcaklığını yüksek sıcaklıklarda serin, düşük sıcaklıklarda ise sıcak tutabilme yeteneği, nanoteknoloji ile geliştirilen termal düzenleyici malzemelerin potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, elbiseye entegre edilmiş ekipman sayesinde ortam ve kullanıcı hakkında anlık ölçümler yapılabilmekte, bu veriler 7/24 komuta merkeziyle paylaşılabilir. Bu tür gelişmeler, astronotların güvenliğini ve görev verimliliğini artırarak uzay keşiflerinin daha da ileriye taşınmasını sağlayacaktır.

Son olarak, solunum yoluyla atılan CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'nun O<sub>2</sub> olarak geri dönüştürülmesi gibi biyomimetik yaklaşımlar, gelecekteki görev elbiselerinin otonom yaşam destek sistemleriyle donatılabileceğini göstermektedir. Bu tür yenilikler, nanoteknolojinin sınırlarını zorlayarak, insanlığın uzayda daha uzun süreler boyunca sağlıklı ve güvenli bir şekilde varlık göstermesine olanak tanıyacaktır.



Şekil 3. Bir atmosfer dışı görev elbisesinde gelecekte yapılması muhtemel geliştirmeler (Potential future enhancements in an extraterrestrial mission suit)

## 6. Sonuç (Conclusion)

Nanoteknolojinin tekstil endüstrisine etkilerinin önümüzdeki yıllarda daha da öne çıkma olasılığı insan ihtiyaçları ile şekillenecektir. Bununla beraber bu ihtiyaçların karşılanmasında çalışmalarla elde edilen bilgi ve birikim yeterli görünmektedir. Bulmacanın parçaları dağılmış şekilde karşımızda durmakta bu noktadan sonra gerekli malzemenin üretimi için entegrasyonun yapılması bulmacanın çözülmesi anlamına gelecektir. Bu bulmacanın çözülmesi için çeşitli disiplinler arası iş birlikleri ile gereken istek ve motivasyonun sağlanması şarttır. Bu sayede nanofiber ve nanopartiküllerle üretilen ileri teknolojik kumaşlar hazırlanacak ve farklı amaçlara hizmet edecek kumaşlarla tasarlanan akıllı giysiler insanın iletişim ihtiyacından sağlık sorunlarının tespitine ya da olası tehlike uyarılarının yapılması ve bunların ilgili birimlere aktarılması gibi interaktif işlevleri yaparken aynı zamanda nanogeneratörler, süperkapasitörler ve fotoelektronik cihazlar sayesinde enerjisini de insan hareketi yada güneş enerjisinden sağlayarak şarj ihtiyacı gerektirmeyecek şekilde üretililebilir.

Antibakteriyel ve antiviral özellikler tıbbi etkileşimin sınırlı olacağı kolonide mikrobiyal kontaminasyon riskini azaltacak, ince atmosferin neden olacağı UV ışınlarına karşı UV koruması zararlı radyasyona karşı etkin bir savunma sunacaktır. Söz konusu uzay görevlerinin bahsedilen geliştirmelerle yapılması nanoteknolojinin tekstil uygulamalarında bulunduğu karşılık büyük bir

potansiyel oluşturmaktadır.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] T. Jeevani, "Nanotextiles- A broader perspective," *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, vol. 2, no. 7, pp. 1–5, 2011. doi:10.4172/2157-7439.1000124
- [2] K. P. Chowdhury, M. A. B. H. Susan, and S. Ahmed, "Nanomaterials for multifunctional textiles," in *Emerging Applications of Nanomaterials*, Materials Research Foundations, pp. 169–217, 2023. doi:10.21741/9781644902288-8
- [3] M. A. Shah, B. M. Pirzada, G. Price, A. L. Shibiru, and A. Qurashi, "Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review," *Journal of Advanced Research*, vol. 38, pp. 55–75, 2022. doi:10.1016/j.jare.2022.01.008
- [4] A. K. M. A. Hosne Asif and M. Z. Hasan, "Application of nanotechnology in modern textiles: A review," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 227–231, Jan. 2018. doi:10.14741/ijcet/v.8.2.5
- [5] A. A. El-Kheir and L. K. El-Gabry, "Potential applications of nanotechnology in functionalization of synthetic fibres (A review)," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 9, pp. 67–85, 2022. doi:10.21608/EJCHEM.2022.106369.4891
- [6] A. Salman, F. A. Metwally, M. K. El-Bisi, and G. A. M. Emara, "Effect of geometrical yarn parameters: Conventional and compact ring spinning on certain functional properties of tio2nps treated woven cotton fabrics," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 63, no. 5, pp. 1757–1766, 2020. doi:10.21608/ejchem.2019.18226.2113
- [7] Y. Wang, S. Lu, J. Zheng, and L. Liang, "Advances in latest application status, challenges, and future development direction of electrospinning technology in the biomedical," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, pp. 1–18, Sep. 2022. doi:10.1155/2022/3791908
- [8] C. I. Idumah, "Influence of nanotechnology in polymeric textiles, applications, and fight against COVID-19," *Journal of the Textile Institute*, vol. 112, no. 12, pp. 2056–2076, 2021. doi:10.1080/00405000.2020.1858600
- [9] R. Mahmud and F. Nabi, "Application of nanotechnology in the field of textile," *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering*, vol. 04, no. 01, pp. 01–06, Jan. 2017. doi:10.9790/019X-0401010106
- [10] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, "A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, 2016. doi:10.1016/j.jare.2015.02.007
- [11] S. Shaarawy, "A review on the development of innovative capabilities in the textile finishing of natural fibers," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 62, no. Part 2, pp. 857–879, 2019. doi:10.21608/EJCHEM.2019.19009.2169
- [12] L. Hu et al., "Stretchable, porous, and conductive energy textiles," *Nano Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 708–714, Feb. 2010. doi:10.1021/nl903949m
- [13] W. Kim, T. Han, Y. Gwon, S. Park, H. Kim, and J. Kim, "Biodegradable and flexible nanoporous films for design and fabrication of active food packaging systems," *Nano Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 3480–3487, Apr. 2022. doi:10.1021/acs.nanolett.2c00246
- [14] H. Saleem and S. J. Zaidi, "Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 22, pp. 1–28, 2020. doi:10.3390/ma13225134
- [15] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. Nogi, Eds., "Chapter 1 - Basic Properties and Measuring Methods of Nanoparticles," in *Nanoparticle Technology Handbook (Third Edition)*, Elsevier, 2018. pp. 3–47. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00001-9
- [16] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. B. T.-N. T. H. (Third E. Nogi, Eds., "Chapter 2 - Structural Control of Nanoparticles," Elsevier, 2018. pp. 49–107. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00002-0
- [17] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. B. T.-N. T. H. (Third E. Nogi, Eds., "Chapter 4 - Control of Nanostructure of Materials," Elsevier, 2018. pp. 169–253. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00004-4
- [18] R. Mishra et al., "The production, characterization and applications of nanoparticles in the textile industry," *Textile Progress*, vol. 46, no. 2, pp. 133–226, 2014. doi:10.1080/00405167.2014.964474
- [19] S. Riaz et al., "Functional finishing and coloration of textiles with nanomaterials," *Coloration Technology*, vol. 134, no. 5, pp. 327–346, 2018. doi:10.1111/cote.12344
- [20] N. Vigneshwaran, "Application of Functional Nanoparticle Finishes on Cotton Textiles," *Trends in Textile Engineering & Fashion Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 358–362, 2018. doi:10.31031/tteft.2018.03.000568



- [21] I. S. Tania, M. Ali, and M. Akter, "Fabrication, characterization, and utilization of ZnO nanoparticles for stain release, bacterial resistance, and UV protection on cotton fabric," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 17, 2022. doi:10.1177/15589250221136378
- [22] W. Raslan, A. El-Halwagy, and H. Elsayad, "Recent Advances in Plasma/Nanoparticles Treatments of Textile Fibers," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, vol. 17, no. 2, pp. 87–105, 2020. doi:10.21608/jtcs.2020.33748.1042
- [23] I. Safarik et al., "Cotton Textile/Iron Oxide Nanozyme Composites with Peroxidase-like Activity: Preparation, Characterization, and Application," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, no. 20, pp. 23627–23637, May 2021. doi:10.1021/acsami.1c02154
- [24] C. K. Kundu, M. T. Hossen, and R. Saha, "Coloration with nanoparticles: Scope for developing simultaneous colouring and functional properties onto textile surfaces—a short review," *Coloration Technology*, vol. 138, no. 5, pp. 443–455, 2022. doi:10.1111/cote.12621
- [25] S. Currie et al., "Rechargeable Potent Anti-Viral Cotton Grafted with a New Quaternized N-Chloramine," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 9, no. 35, pp. 1–13, 2022. doi:10.1002/admi.202201338
- [26] D. Lee, J. S. Sang, P. J. Yoo, T. J. Shin, K. W. Oh, and J. Park, "Machine-washable smart textiles with photothermal and antibacterial activities from nanocomposite fibers of conjugated polymer nanoparticles and polyacrylonitrile," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, 2019. doi:10.3390/polym11010016
- [27] A. Yadav et al., "Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles," *Bulletin of Materials Science*, vol. 29, no. 6, pp. 641–645, 2006. doi:10.1007/s12034-006-0017-y
- [28] S. Fateixa, M. Wilhelm, H. I. S. Nogueira, and T. Trindade, "SERS and Raman imaging as a new tool to monitor dyeing on textile fibres," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 47, no. 10, pp. 1239–1246, 2016. doi:10.1002/jrs.4947
- [29] N. Vrinceanu, S. Bucur, C. M. Rambu, S. Neculai-Valeanu, S. Ferrandiz Bou, and M. P. Sucheai, "Nanoparticle/biopolymer-based coatings for functionalization of textiles: recent developments (a minireview)," *Textile Research Journal*, vol. 92, no. 19–20, pp. 3889–3902, 2022. doi:10.1177/00405175211070613
- [30] V. Bhandari, S. Jose, P. Badanayak, A. Sankaran, and V. Anandan, "Antimicrobial Finishing of Metals, Metal Oxides, and Metal Composites on Textiles: A Systematic Review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 61, no. 1, pp. 86–101, Jan. 2022. doi:10.1021/acs.iecr.1c04203
- [31] M. Yazıcı, Ö. Önal, and O. Konuş, "Graphene Katkılı Sıvılaştırılmış Fındık Kabuğu / Polyvinyl pyrrolidone (PVP) Nanoyüzeylerin Elektrosinning Tekniği ile Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu," *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 184–194, 2018.
- [32] M. Afshari, "1 - Introduction," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 1–8. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00001-5
- [33] X. Qin and S. Subianto, "17 - Electrospun nanofibers for filtration applications," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 449–466. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00017-9
- [34] T. R. Hayes and B. Su, "15 - Wound dressings," in Woodhead Publishing Series in Biomaterials, L. A. Bosworth and S. B. T.-E. for T. R. Downes, Eds. Woodhead Publishing, 2011. pp. 317–339. doi:10.1533/9780857092915.2.317
- [35] R. Bagherzadeh, M. Gorji, M. S. Sorayani Bafgi, and N. Saveh-Shemshaki, "18 - Electrospun conductive nanofibers for electronics," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 467–519. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00018-0
- [36] S. Siengchin, "A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments," *Defence Technology*, vol. 24, pp. 1–17, 2023. doi:10.1016/j.dt.2023.02.025
- [37] C. J. Luo, S. D. Stoyanov, E. Stride, E. Pelan, and M. Edirisinghe, "Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence," *Chemical Society Reviews*, vol. 41, no. 13, pp. 4708–4735, 2012. doi:10.1039/C2CS35083A
- [38] P. A. Mouthuy, N. Zargar, O. Hakimi, E. Lostis, and A. Carr, "Fabrication of continuous electrospun filaments with potential for use as medical fibres," *Biofabrication*, vol. 7, no. 2, 2015. doi:10.1088/1758-5090/7/2/025006
- [39] A. Sattar, A. Khatri, S. Ali, and F. Ahmed, "Digital ink-jet printing of regenerated cellulose nanofibrous mats with reactive inks," *Coloration Technology*, vol. 140, no. 2, pp. 279–286, 2024. doi:1111/cote.12713
- [40] R. E. Neisiany, S. N. Khorasani, M. Naeimirad, J. K. Y. Lee, and S. Ramakrishna, "Improving Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite by Incorporating Functionalized Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 302, no. 5, pp. 1–11, 2017. doi:10.1002/mame.201600551
- [41] K. Abe and H. Yano, "Cellulose nanofiber-based hydrogels with high mechanical strength," *Cellulose*, vol. 19, no. 6, pp. 1907–1912, 2012. doi:10.1007/s10570-012-9784-3
- [42] V. Beachley and X. Wen, "Fabrication of nanofiber reinforced protein structures for tissue engineering," *Materials Science*

and *Engineering C*, vol. 29, no. 8, pp. 2448–2453, 2009. doi:10.1016/j.msec.2009.07.008

[43] X. Li et al., “Resin composites reinforced by nanoscaled fibers or tubes for dental regeneration,” *BioMed Research International*, vol. 2014, 2014. doi:10.1155/2014/542958

[44] V. M. Merkle, L. Zeng, M. J. Slepian, and X. Wu, “Core-shell nanofibers: Integrating the bioactivity of gelatin and the mechanical property of polyvinyl alcohol,” *Biopolymers*, vol. 101, no. 4, pp. 336–346, 2014. doi:10.1002/bip.22367

[45] K. Abe, S. Ifuku, M. Kawata, and H. Yano, “Preparation of tough hydrogels based on  $\beta$ -chitin nanofibers via NaOH treatment,” *Cellulose*, vol. 21, no. 1, pp. 535–540, 2014. doi:10.1007/s10570-013-0095-0

[46] Z. Kaya, E. Balcioglu, and H. Gün, “Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Deformasyon Hızındaki Mod I ve Mod I/II Kırılma Davranışlarının İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 843–853, 2022. doi:10.2339/politeknik.707130

[47] B. Ergene, “Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 1, pp. 469–484, 2022. doi:10.17341/GAZIMMFD.934143

[48] A. Çoşgun and G. Yılmaz, “Damla Döküm Yöntemi ile Üretilen Perovskit Filmlerin Yaşlanma Süreçlerinin Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri ile Belirlenmesi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, vol. 17, no. 1, pp. 44–54, 2022. doi:10.29233/sdufeff.992932

[49] H. İ. Yavuz and R. Yamanoglu, “ $\beta$  Tipi Ti Alaşımlarının Özellikleri Üzerine Bir Derleme: Mikroyapı, Mekanik, Korozyon Özellikleri ve Üretim Yöntemleri,” *Politeknik Dergisi*, vol. 26, no. 4, pp. 1601–1620, 2023. doi:10.2339/politeknik.987216

[50] G. Sadullahoğlu, “Production and Characterization of B2O3 Added M-Type Barium Hexaferrite Composite Magnet,” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 382–389, 2021. doi:10.29137/umagd.737894

[51] N. Taş and F. Egilmez, “İmplant Destekli Hibrit Protezlerin Yapımında Kullanılan Materyaller ve Üretim Yöntemleri,” *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, pp. 1–1, 2021. doi:10.17567/ataunidf.757321

[52] Y. C. Toklu, A. E. Çerçevik, and M. Şahinöz, “Otomatik Yapı Üretim Teknolojisinde Kullanılabilecek Malzemelerin Belirlenmesi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 1, p. 51, 2016. doi:10.19113/sdufed.73967

[53] Ş. Kılınçarslan and Y. Şimsek Türker, “Ahşap Malzemelerin FRP ile Güçlendirilmesinin Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi,” *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 23–30, 2020. doi:10.35354/tbed.615101

[54] K. Al and E. Bayrakdar Ates, “Sustainable Hydrogen Production Technologies: Biomass Based Approaches,” *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 18–37, 2022. doi:10.55930/jonas.1101384

[55] B. Karagüzel Kayaoğlu, I. Göcek, H. Kizil, and L. Trabzon, “Functional nano and micro-scale thin film deposition on textiles: Emerging technologies and applications,” *Journal of Textile Engineering*, vol. 19, no. 88, pp. 39–47, 2012. doi:10.7216/130075992012198805

[56] K. Müller et al., “Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields,” *Nanomaterials*, vol. 7, no. 4, 2017. doi:10.3390/nano7040074

[57] Ngakan Putu Gede Satria Kesumayasa, Suriati, and Rudianta, “Physicochemical Properties of Porang Nanocoating with the Addition of Essential Oils,” *Sustainable Environment Agricultural Science*, vol. 7, no. 2, pp. 130–138, 2023. doi:10.22225/seas.7.2.6842.130-138

[58] K. Willems, P. Lauweryns, G. Verleye, and J. Van Goethem, “Randomized controlled trial of posterior lumbar interbody fusion with Ti- And cap-nanocoated polyetheretherketone cages: Comparative study of the 1-year radiological and clinical outcome,” *International Journal of Spine Surgery*, vol. 13, no. 6, pp. 575–587, 2019. doi:10.14444/6080

[59] I. Dominguez, I. Del Villar, O. Fuentes, J. M. Corres, and I. R. Matias, “Interdigital concept in photonic sensors based on an array of lossy mode resonances,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2021. doi:10.1038/s41598-021-92765-0

[60] T. Phan, J. E. Jones, M. Chen, D. K. Bowles, W. P. Fay, and Q. Yu, “A Biocompatibility Study of Plasma Nanocoatings onto Cobalt Chromium L605 Alloy for Cardiovascular Stent Applications,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 17, 2022. doi:10.3390/ma15175968

[61] M. I. Abdulraheem, A. Y. Moshood, Y. Chen, H. Chen, H. Zhang, and J. Hu, “Advancements in Designing Smart and Intelligent Nanocoatings,” in *Sustainable Approach to Protective Nanocoatings*, 2024. pp. 57–87doi:10.4018/979-8-3693-3136-1.ch003

[62] A. Thakur and A. Kumar, “Chapter 19 - Self-healing nanocoatings for automotive application,” in *Micro and Nano Technologies*, H. Song, T. A. Nguyen, G. Yasin, N. B. Singh, and R. K. B. T.-N. in the A. I. Gupta, Eds. Elsevier, 2022. pp. 403–427. doi:10.1016/B978-0-323-90524-4.00019-0

[63] E. Pakdel, J. Fang, J. Fang, L. Sun, X. Wang, and X. Wang, “Nanocoatings for Smart Textiles,” in *Smart Textiles*, 2018. pp. 247–300. doi:10.1002/9781119460367.ch8.

[64] T. I. Shaheen, “Nanotechnology for modern textiles: highlights on smart applications,” *Journal of the Textile Institute*, vol. 113, no. 10, pp. 2274–2284, 2021. doi:10.1080/00405000.2021.1962625

- [65] M. Zayed, M. Bakr, and H. Ghazal, "Recent developments in the utilization of polymer nanocomposites in textile applications," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, 2023. doi:10.21608/jtcsps.2023.193744.1172
- [66] S. Gowri, L. Almeida, T. Amorim, N. Carneiro, A. Pedro Souto, and M. Fátima Esteves, "Polymer Nanocomposites for Multifunctional Finishing of Textiles - a Review," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 13, pp. 1290–1306, Mar. 2010. doi:10.1177/0040517509357652
- [67] S. Gowri, M. A. Khan, and A. K. Srivastava, "Textile finishing using polymer nanocomposites for radiation shielding, flame retardancy and mechanical strength," *Textile & Leather Review*, vol. 4, no. 3, pp. 160–180, 2021. doi:10.31881/TLR.2021.07
- [68] J. Bouchard, A. Cayla, V. Lutz, C. Campagne, and E. Devaux, "Electrical and mechanical properties of phenoxy/multiwalled carbon nanotubes multifilament yarn processed by melt spinning," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 20, pp. 2106–2115, 2012. doi:10.1177/0040517512450760
- [69] S. Yao, P. Swetha, and Y. Zhu, "Nanomaterial-Enabled Wearable Sensors for Healthcare," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 1–27, 2018. doi:10.1002/adhm.201700889
- [70] S. Parham et al., "Textile/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposite as an antimicrobial and radical scavenger wound dressing," *RSC Advances*, vol. 6, no. 10, pp. 8188–8197, 2016. doi:10.1039/C5RA20361A
- [71] L. Noreen et al., "Multifunctional Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-rGO-Coated Textiles for Clean Water Production by Solar-Driven Evaporation, Photocatalysis, and Disinfection," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 5, pp. 6343–6350, Feb. 2020. doi:10.121/acsami.9b16043
- [72] V. T. Novi, A. Gonzalez, J. Brockgreitens, and A. Abbas, "Highly efficient and durable antimicrobial nanocomposite textiles," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2022. doi:10.1038/s41598-022-22370-2
- [73] D. C. Çelikel, "Smart E-Textile Materials," in *Advanced Functional Materials*, N. Tasaltin, P. S. Nnamchi, and S. Saud, Eds. Rijeka: IntechOpen, 2020. doi:10.5772/intechopen.92439
- [74] N. K. Persson, J. G. Martinez, Y. Zhong, A. Maziz, and E. W. H. Jager, "Actuating Textiles: Next Generation of Smart Textiles," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 10, pp. 1–12, 2018. doi:10.1002/admt.201700397
- [75] N. Y. Abu-Thabit, "Chemical Oxidative Polymerization of Polyaniline: A Practical Approach for Preparation of Smart Conductive Textiles," *Journal of Chemical Education*, vol. 93, no. 9, pp. 1606–1611, Sep. 2016. doi:10.1021/acs.jchemed.6b00060
- [76] A. M. Grancarić, I. Jerković, V. Koncar, C. Cochrane, F. M. Kelly, D. Soulat, X. Legrand, "Conductive polymers for smart textile applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 48, no. 3, 2018. doi:10.1177/1528083717699368
- [77] K. Cherenack, C. Zysset, T. Kinkeldei, N. Münzenrieder, and G. Tröster, "Woven electronic fibers with sensing and display functions for smart textiles," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 45, pp. 5178–5182, 2010. doi:10.1002/adma.201002159
- [78] B. Younes, "Smart E-textiles: A review of their aspects and applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 53, pp. 1–23, 2023. doi:10.1177/15280837231215493
- [79] A. Salman, F. A. Metwally, M. Elbisi, and G. A. M. Emara, "Applications of nanotechnology and advancements in smart wearable textiles: An overview," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 63, no. 6, pp. 2177–2184, 2020. doi:10.21608/ejchem.2019.18223.2112
- [80] S. H. W. Ossevoort, "14 - Improving the sustainability of smart textiles," in *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers*, T. Kirstein, Ed. Woodhead Publishing, 2013. pp. 399–419. doi:10.1533/9780857093530.3.399
- [81] K. Cherenack and L. van Pieterse, "Smart textiles: Challenges and opportunities," *Journal of Applied Physics*, vol. 112, no. 9, p. 91301, 2012. doi:10.1063/1.4742728
- [82] E. Özdoğan, A. Demir, and N. Seventekin, "Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 3, pp. 159–168, 2006.
- [83] L.-P. Yu, C.-Y. Xing, S.-T. Fan, F. Liu, B.-J. Li, and S. Zhang, "β-Cyclodextrin-Modified Polyacrylonitrile Nanofibrous Scaffolds with Breathability, Moisture-Wicking, and Antistatic Performance," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, no. 28, pp. 10217–10224, Jul. 2021. doi:10.1021/acs.iecr.1c01744
- [84] H. J. Choi, M. S. Kim, D. Ahn, S. Y. Yeo, and S. Lee, "Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2019. doi:10.1038/s41598-019-42495-1
- [85] S. Jose, N. Shanmugam, S. Das, A. Kumar, and P. Pandit, "Coating of lightweight wool fabric with nano clay for fire retardancy," *Journal of the Textile Institute*, vol. 110, no. 5, pp. 764–770, 2019. doi:10.1080/00405000.2018.1516529
- [86] J. Chen et al., "Preparation of bioCl/bi2wo6 photocatalyst for efficient fixation on cotton fabric: Applications in uv shielding and self-cleaning performances," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2021. doi:10.3390/ma14227002
- [87] K. Qi, W. A. Daoud, J. H. Xin, C. L. Mak, W. Tang, and W. P. Cheung, "Self-cleaning cotton," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, no. 47, pp. 4567–4574, 2006. doi:10.1039/B610861J

- [88] M. A. Tănase et al., "Facile in situ synthesis of zno flower-like hierarchical nanostructures by the microwave irradiation method for multifunctional textile coatings," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 10, 2021. doi:10.3390/nano11102574
- [89] R. Dastjerdi and M. Montazer, "A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 79, no. 1, pp. 5–18, 2010. doi:10.1016/j.colsurfb.2010.03.029
- [90] H. F. Moafi, A. F. Shojaie, and M. A. Zanjanchi, "Semiconductor-Assisted Self-Cleaning Polymeric Fibers Based on Zinc Oxide Nanoparticles," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 121, no. 6, pp. 3111–3732, 2011. doi: 10.1002/app.34179
- [91] H. Wang, Y. Hu, L. Zhang, and C. Li, "Self-Cleaning Films with High Transparency Based on TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Synthesized via Flame Combustion," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 8, pp. 3654–3662, Apr. 2010. doi:10.1021/ie901782w
- [92] B. K. Tudu, A. Kumar, and B. Bhushan, "Fabrication of superoleophobic cotton fabric for multi-purpose applications," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 377, no. 2150, pp. 1–13, 2019. doi:10.1098/rsta.2019.0129
- [93] Z. Geng et al., "High-performance TiO<sub>2</sub> nanotubes/poly(aryl ether sulfone) hybrid self-cleaning anti-fouling ultrafiltration membranes," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 3, 2019. doi:10.3390/polym11030555
- [94] G. Zhang, D. Wang, J. Yan, Y. Xiao, W. Gu, and C. Zang, "Study on the photocatalytic and antibacterial properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles-coated cotton fabrics," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019. doi:10.3390/ma12122010
- [95] M. J. Uddin et al., "Cotton textile fibres coated by Au/TiO<sub>2</sub> films: Synthesis, characterization and self cleaning properties," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 199, no. 1, pp. 64–72, 2008, doi:10.1016/j.jphotochem.2008.05.004
- [96] S. Naderizadeh et al., "Superhydrophobic Coatings from Beeswax-in-Water Emulsions with Latent Heat Storage Capability," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 6, no. 5, pp. 1–11, 2019. doi:10.1002/admi.201801782
- [97] M. Yu, G. Gu, W. D. Meng, and F. L. Qing, "Superhydrophobic cotton fabric coating based on a complex layer of silica nanoparticles and perfluorooctylated quaternary ammonium silane coupling agent," *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 7, pp. 3669–3673, 2007. doi:10.1016/j.apsusc.2006.07.086
- [98] A. Synytska, R. Khanum, L. Ionov, C. Cherif, and C. Bellmann, "Water-Repellent Textile via Decorating Fibers with Amphiphilic Janus Particles," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 3, no. 4, pp. 1216–1220, Apr. 2011. doi:10.1021/am200033u
- [99] F. Shams-Ghahfarokhi, A. Khoddami, Z. Mazrouei-Sebdani, J. Rahmatinejad, and H. Mohammadi, "A new technique to prepare a hydrophobic and thermal insulating polyester woven fabric using electro-spraying of nano-porous silica powder," *Surface and Coatings Technology*, vol. 366, no. October 2018, pp. 97–105, 2019. doi:10.1016/j.surfcoat.2019.03.025
- [100] Y. Chen, J. Fu, B. Dang, Q. Sun, H. Li, and T. Zhai, "Artificial Wooden Nacre: A High Specific Strength Engineering Material," *ACS Nano*, vol. 14, no. 2, pp. 2036–2043, Feb. 2020. doi:10.1021/acsnano.9b08647
- [101] H. P. Aravind, S. A. Jadhav, V. B. More, K. D. Sonawane, and P. S. Patil, "Novel One Step Sonosynthesis and Deposition Technique to Prepare Silver Nanoparticles Coated Cotton Textile with Antibacterial Properties," *Colloid Journal*, vol. 81, no. 6, pp. 720–727, 2019. doi:10.1134/S1061933X19070019
- [102] S. Wirunchit, N. Wonganan, and W. Koetnuyom, "Multi Self-cleaning Properties of Zinc Oxide Nanoparticles/Polydimethylsiloxane (ZnO/PDMS) Composite on Polyester Textile," *Current Applied Science and Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 1–12, 2023. doi:10.55003/cast.2023.05.23.015
- [103] M. Salat, P. Petkova, J. Hoyo, I. Perelshtein, A. Gedanken, and T. Tzanov, "Durable antimicrobial cotton textiles coated sonochemically with ZnO nanoparticles embedded in an in-situ enzymatically generated bioadhesive," *Carbohydrate Polymers*, vol. 189, no. February, pp. 198–203, 2018. doi:10.1016/j.carbpol.2018.02.033
- [104] S. Mondal, "Nanomaterials for UV protective textiles," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, no. 4, pp. 5592S–5621S, 2022. doi:10.1177/1528083721988949.
- [105] D. Mihailović et al., "Multifunctional properties of polyester fabrics modified by corona discharge/air RF plasma and colloidal TiO<sub>2</sub> nanoparticles," *Polymer Composites*, vol. 32, no. 3, pp. 390–397, 2011. doi: 10.1002/pc.21053
- [106] Z. Wang, M. Xue, K. Huang, and Z. Liu, "Textile Dyeing Wastewater Treatment," *Advances in Treating Textile Effluent*, 2011. doi:10.5772/22670
- [107] J. Yu et al., "Cotton fabric finished by PANI/TiO<sub>2</sub> with multifunctions of conductivity, anti-ultraviolet and photocatalysis activity," *Applied Surface Science*, vol. 470, no. July 2018, pp. 84–90, 2019. doi:10.1016/j.apsusc.2018.11.112
- [108] N. R. Dhineshbabu and S. Bose, "UV resistant and fire retardant properties in fabrics coated with polymer based nanocomposites derived from sustainable and natural resources for protective clothing application," *Composites Part B: Engineering*, vol. 172, no. February, pp. 555–563, 2019. doi:10.1016/j.compositesb.2019.05.013
- [109] S. Xi, L. Wang, H. Xie, and W. Yu, "Superhydrophilic Modified Elastomeric RGO Aerogel Based Hydrated Salt Phase Change

- Materials for Effective Solar Thermal Conversion and Storage," *ACS Nano*, vol. 16, no. 3, pp. 3843–3851, 2022. doi:10.1021/acsnano.1c08581
- [110] J. Wu et al., "A Trimode Thermoregulatory Flexible Fibrous Membrane Designed with Hierarchical Core–Sheath Fiber Structure for Wearable Personal Thermal Management," *ACS Nano*, vol. 16, no. 8, pp. 12801–12812, Aug. 2022. doi:10.1021/acsnano.2c04971
- [111] J. Cui et al., "Ultra-Stable Phase Change Coatings by Self-Cross-Linkable Reactive Poly(ethylene glycol) and MWCNTs," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 10, pp. 1–10, 2022. doi:10.1002/adfm.202108000
- [112] M. A. Ali, A. G. Hassabo, K. M. Seddik, S. Y. M. Gad, and N. M. Aly, "Characterization of the Thermal and Physico-Mechanical Properties of Cotton and Polyester Yarns Treated with Phase Change Materials Composites," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 13, pp. 21–37, 2022. doi:10.21608/EJCHEM.2022.143640.6270
- [113] C. Cherif, N. H. A. Tran, M. Kirsten, H. Brünig, and R. Vogel, "Environmentally friendly and highly productive bi-component melt spinning of thermoregulated smart polymer fibres with high latent heat capacity," *Express Polymer Letters*, vol. 12, no. 3, pp. 203–214, 2018. doi:10.3144/expresspolymlett.2018.19
- [114] V. Skurkyte-Papieviene, A. Abraitiene, A. Sankauskaite, V. Rubeziene, and J. Baltusnikaite-Guzaitiene, "Enhancement of the thermal performance of the paraffin-based microcapsules intended for textile applications," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 7, pp. 1–16, 2021. doi:10.3390/polym13071120
- [115] M. A. Ali, A. G. Hassabo, K. M. Seddik, Sarah yahia, and N. M. Aly, "Characterization of the Thermal and Physico-Mechanical Properties of Cotton and Polyester Yarns Treated with Phase Change Materials Composites," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 131, pp. 21–37, 2022. doi:10.21608/ejchem.2022.143640.6270
- [116] T. Textor and B. Mahltig, "A sol-gel based surface treatment for preparation of water repellent antistatic textiles," *Applied Surface Science*, vol. 256, no. 6, pp. 1668–1674, 2010. doi:10.1016/j.apsusc.2009.09.091
- [117] E. Samuel, B. Joshi, M. W. Kim, Y. Il Kim, M. T. Swihart, and S. S. Yoon, "Hierarchical zeolitic imidazolate framework-derived manganese-doped zinc oxide decorated carbon nanofiber electrodes for high performance flexible supercapacitors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 371, no. February, pp. 657–665, 2019. doi:10.1016/j.cej.2019.04.065
- [118] N. Nan et al., "A Stretchable, Highly Sensitive, and Multimodal Mechanical Fabric Sensor Based on Electrospun Conductive Nanofiber Yarn for Wearable Electronics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 1–11, 2019. doi:10.1002/admt.201800338
- [119] Y. Huang et al., "From Industrially Weavable and Knittable Highly Conductive Yarns to Large Wearable Energy Storage Textiles," *ACS Nano*, vol. 9, no. 5, pp. 4766–4775, May 2015. doi:10.1021/acsnano.5b00860
- [120] Y. Huang et al., "Magnetic-Assisted, Self-Healable, Yarn-Based Supercapacitor," *ACS Nano*, vol. 9, no. 6, pp. 6242–6251, Jun. 2015. doi:10.1021/acsnano.5b01602
- [121] H. Qu, O. Semenikhin, and M. Skorobogatiy, "Flexible fiber batteries for applications in smart textiles," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 2, p. 25012, 2014. doi:10.1088/0964-1726/24/2/025012
- [122] Y. Liu, S. Gorgutsa, C. Santato, and M. Skorobogatiy, "Flexible, Solid Electrolyte-Based Lithium Battery Composed of LiFePO<sub>4</sub> Cathode and Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Anode for Applications in Smart Textiles," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, no. 4, pp. A349–A356, 2012. doi:10.1149/2.020204jes
- [123] W. Kim et al., "Soft fabric-based flexible organic light-emitting diodes," *Organic Electronics*, vol. 14, no. 11, pp. 3007–3013, 2013. doi:10.1016/j.orgel.2013.09.001
- [124] S. Choi et al., "Multi-directionally wrinkle-able textile OLEDs for clothing-type displays," *npj Flexible Electronics*, vol. 4, no. 1, p. 33, Nov. 2020. doi:10.1038/s41528-020-00096-3
- [125] Q. Zhao, A. K. Yetisen, A. Sabouri, S. H. Yun, and H. Butt, "Printable Nanophotonic Devices via Holographic Laser Ablation," *ACS Nano*, vol. 9, no. 9, pp. 9062–9069, Sep. 2015. doi:10.1021/acsnano.5b03165
- [126] M. Liao et al., "Multicolor, Fluorescent Supercapacitor Fiber," *Small*, vol. 14, no. 43, pp. 1–6, 2018. doi:10.1002/smll.201702052
- [127] I. Sayed, J. Berzowska, and M. Skorobogatiy, "Jacquard-Woven Photonic Bandgap Fiber Displays," *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 14, no. 4, pp. 97–105, 2010. doi:10.1108/RJTA-14-04-2010-B011
- [128] M. Wasim, M. R. Khan, M. Mushtaq, and A. Naeem, "Surface Modification of Bacterial Cellulose by Copper and Zinc Oxide Sputter Coating for UV-Resistance/Antistatic/Antibacterial Characteristics," *Coatings*, vol. 10, no. 4, pp. 364, 2020. doi:10.3390/coatings10040364
- [129] S. W. Chen et al., "An Ultrathin Flexible Single-Electrode Triboelectric-Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting and Instantaneous Force Sensing," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 1, 2017. doi:10.1002/aenm.201601255
- [130] M. Xu et al., "A Soft and Robust Spring Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Arbitrary Directional Vibration Energy and Self-Powered Vibration Sensing," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 1–9, 2018.



doi:10.1002/aenm.201702432

[131] Y. Zhang et al., "Performance Enhancement of Flexible Piezoelectric Nanogenerator via Doping and Rational 3D Structure Design For Self-Powered Mechanosensational System," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 42, pp. 1–12, 2019. doi:10.1002/adfm.201904259

[132] J. H. Lee et al., "Micropatterned P(VDF-TrFE) film-based piezoelectric nanogenerators for highly sensitive self-powered pressure sensors," *Advanced Functional Materials*, vol. 25, no. 21, pp. 3203–3209, 2015. doi:10.1002/adfm.201500856

[133] C. H. Kwon et al., "High-power biofuel cell textiles from woven bisrolled carbon nanotube yarns," *Nature Communications*, vol. 5, pp. 1–7, 2014. doi:10.1038/ncomms4928

[134] C. Kwon et al., "High-power hybrid biofuel cells using layer-by-layer assembled glucose oxidase-coated metallic cotton fibers," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, p. 4479, Oct. 2018. doi:10.1038/s41467-018-06994-5

[135] S. Ortelli, G. Malucelli, M. Blosi, I. Zanoni, and A. L. Costa, "NanoTiO<sub>2</sub> @DNA complex: a novel eco, durable, fire retardant design strategy for cotton textiles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 546, pp. 174–183, 2019. doi:10.1016/j.jcis.2019.03.055

[136] B. Mirani et al., "Facile Method for Fabrication of Meter-Long Multifunctional Hydrogel Fibers with Controllable Biophysical and Biochemical Features," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 8, pp. 9080–9089, Feb. 2020. doi:10.1021/acsami.9b23063

[137] V. Kumar, P. Pallavi, S. K. Sen, and S. Raut, "Harnessing the potential of white rot fungi and ligninolytic enzymes for efficient textile dye degradation: A comprehensive review," *Water Environment Research*, vol. 96, no. 1, pp. 1–23, 2024. doi:10.1002/wer.10959

[138] Y. Song, Y. Meng, K. Huo, Z.-Q. Wang, Y. Li, M. Yu, B. Zhang, J. Li "Greenly and Efficiently Dyeing Cotton Fabric with Custom-Tailored Reactive Dyes via Electron Beam Irradiation," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 12, no. 8, pp. 3121–3129, 2024. doi:10.1021/acssuschemeng.3c07075

[139] G. Varadarajan and P. Venkatachalam, "Sustainable textile dyeing processes," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 113–122, 2016. doi:10.1007/s10311-015-0533-3

[140] H. Mamane, S. Altshuler, E. Sterenzon, and V. K. Vadivel, "Decolorization of dyes from textile wastewater using biochar: A review," *Acta Innovations*, no. 37, pp. 36–46, 2020. doi:10.32933/ActaInnovations.37.3

[141] S. Yadav, S. Punia, H. R. Sharma, and A. Gupta, "Nano-remediation for the decolourisation of textile effluents: A review," *Nanofabrication*, vol. 7, no. 217, pp. 217–243, 2022. doi:10.37819/nanofab.007.226

[142] M. Jiang, K. Ye, J. Deng, J. Lin, W. Ye, S. Zhao, and B. Van der Bruggen "Conventional Ultrafiltration As Effective Strategy for Dye/Salt Fractionation in Textile Wastewater Treatment," *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 18, pp. 10698–10708, Sep. 2018. doi:10.1021/acs.est.8b02984

[143] G. Weber, H. L. Chen, E. Hinsch, S. Freitas, and S. Robinson, "Pigments extracted from the wood-staining fungi *Chlorociboria aeruginosa*, *Scytalidium cuboideum*, and *S. ganodermophthorum* show potential for use as textile dyes," *Coloration Technology*, vol. 130, no. 6, pp. 445–452, 2014. doi:10.1111/cote.12110

[144] D. Tatman and G. Karakan Günaydin, "Natural Dyeing of Buldan Handwoven Fabrics With Plant Shell Extracts: a Step Towards Sustainable Textile," *Muğla Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 127–136, 2021. doi:10.22531/muglajsci.886688

[145] H. M. Ahmed, M. M. Abdellatif, S. Ibrahim, and F. H. H. Abdellatif, "Mini-emulsified Copolymer/Silica nanocomposite as effective binder and self-cleaning for textiles coating," *Progress in Organic Coatings*, vol. 129, no. October 2018, pp. 52–58, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.01.002

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

