



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ  
DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING

Cilt/Vol: 39

Sayı/Issue: 1

Mart/March 2024

ISSN 2757-9255



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ**  
Cukurova University,  
Journal of the Faculty of Engineering



**Sahibi (Owner)**

Ali KESKİN

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

**Editör (Editor)**

Serin MEZARCIÖZ

**EDİTÖR KURULU (Editorial Board)**

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)  
Umur ORHAN (Çukurova Üniversitesi)  
Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)  
Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)  
Hüseyin VAPUR (Çukurova Üniversitesi)  
Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)  
Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)  
Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)  
Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)  
Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)  
Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)  
Hüsametlin BULUT (Harran Üniversitesi)  
Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)  
Mehmet Emin AYDIN (University of the  
West of England, İngiltere)  
Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,  
ABD)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)  
Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (Çukurova Üniversitesi)  
Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)  
Hüseyin ERTEN (Çukurova Üniversitesi)  
Belgin BAYAT (Çukurova Üniversitesi)  
Mustafa ÖZCANLI (Çukurova Üniversitesi)  
R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)  
Onur ERMAN (Çukurova Üniversitesi)  
Yusuf KUVVETLİ (Çukurova Üniversitesi)  
Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)  
Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)  
Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)  
Serter ATABAY (American University of Sharjah,  
United Arab Emirates)  
Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,  
Qatar)  
Tamio ENDO (Mie University-Japonya)

**Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.**

Dergimiz TÜBİTAK ULAKBİM Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.  
Indexed by TÜBİTAK ULAKBİM Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

**Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**  
**(ISSN: 1019-1011)**

**YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT**

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA  
Tel : (322) 338 63 57 – (322) 338 70 50 E-posta: cu.mmfdergi@gmail.com

## AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. **“Araştırma ve uygulama içeren makaleleri”** yayımlanmaktadır.

## AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes **“articles of research and practice”**.



## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Momordica Charantina Ekstraktının Amfoterisin B ve Miltefosin İlaç Kombinasyonları ile Leishmania Parazitleri Üzerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi.....</b>	<b>1</b>
<i>Investigation of the Cytotoxic Effects of Momordica Charantina Extract on Leishmania Parasites with Amphotericin B and Miltefosine Drug Combinations</i>	
<b>Kübra KELLEÇİ, Murat IHLAMUR, Melisa ÖZKAN ve Emrah Şefik ABAMOR</b>	
<b>M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi.....</b>	<b>9</b>
<i>Lightweighting of an M3 Class Electric Bus Under Different Scenarios with Finite Element Analysis</i>	
<b>Ahmet ÖZCAN ve Celalettin YÜCE</b>	
<b>Kısa Pistli Uçak Gemilerinden Operasyonel Olarak İHA Kaldırmak İçin Maliyet Etkin Bir Yaklaşım .....</b>	<b>23</b>
<i>A Cost-Effective Approach to Operationally Removing UAVS from Short-Runway Aircraft Carriers</i>	
<b>Mustafa MURAT ve Fahrettin ÖZTÜRK</b>	
<b>Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Mersin-Gaziantep Yüksek Hızlı Tren Hattı için İstasyon Yeri Seçimi.....</b>	<b>31</b>
<i>Station Location Selection for Mersin-Gaziantep High Speed Train Line with Analytical Hierarchy Process</i>	
<b>Olcay KALAN</b>	
<b>Grafen Katkısının Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplanmış 3005 Alaşımının Erozyon Korozyon Davranışı Üzerine Etkisi .....</b>	<b>47</b>
<i>Effect of Graphene Addition on Erosion Corrosion Behavior of 3005 Alloy Coated by Micro-Arc Oxidation Method</i>	
<b>Aysun AYDAY, Yaren BALABAN ve Ayça ŞİMŞEK</b>	
<b>Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Performans Analizi.....</b>	<b>57</b>
<i>Performance Analysis of Ground Source Heat Pump With Artificial Neural Networks Approach</i>	
<b>Netice DUMAN, Ahmet Gürkan YÜKSEK, Mustafa CANER ve Ertan BUYRUK</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>A Case Study of Nelder Mead Simplex Optimization Algorithm: Trade-Offs of Sprienski Fractal Bowtie Antenna Parameters .....</b>	<b>73</b>
<i>Nelder Mead Simpleks Optimizasyon Algoritması Üzerine Bir Durum Çalışması: Sprienski Fraktal Bowtie Anten Parametrelerinin Ödünleşimleri</i>	
<b>Duygu Nazan GENÇOĞLAN</b>	
<b>Examining the Effects of a Flood Event in the Lower Ceyhan Basin in 1980 Using Historical Satellite Data .....</b>	<b>85</b>
<i>1980 Yılında Aşağı Ceyhan Havzasında Gerçekleşen Taşkın Olayının Tarihsel Uydu Verisi Kullanılarak İncelenmesi</i>	
<b>Şerife Pınar GÜVEL, Mehmet Ali AKGÜL ve Recep YURTAL</b>	
<b>Uzak Kule Merkezi ile Kontrol Edilen Havalimanlarında Bulanık Mantık Tabanlı Uçak İniş Öncelik Sıralaması .....</b>	<b>95</b>
<i>Fuzzy Logic Based Aircraft Landing Priority at Airports Controlled by Remote Tower Center</i>	
<b>Hatice DOĞAN ve Fatma YILDIRIM DALKIRAN</b>	
<b>İlgın Linyit Kömürünün Yağ Aglomerasyonunun Ultrasonik Proses ile İyileştirilmesi .....</b>	<b>107</b>
<i>Improvement of Oil Agglomeration of Ilgın Lignite Coal by Ultrasonic Process</i>	
<b>Kiraz EŞMELİ</b>	
<b>The Effect of Riblets on the Aerodynamic Performance of NACA 0018 Airfoil.....</b>	<b>119</b>
<i>Yivlerin NACA 0018 Kanat Profilinin Aerodinamik Performansı Üzerine Etkisi</i>	
<b>Emre GÜLER, Engin PINAR ve Tahir DURHASAN</b>	
<b>Depolama Entegreli Dağıtım Sistemlerinin Ekonomik Optimizasyonu.....</b>	<b>133</b>
<i>Economic Optimization of Storage Integrated Distribution Systems</i>	
<b>Fatma AVLİ FIRIŞ, İsrail KARADÖL ve Ökkeş Fatih KEÇECİOĞLU</b>	
<b>The Use of the Hingedan (<i>Ferula pseudalliacea</i>) in the Production of Functional Gluten-Free Biscuits.....</b>	<b>145</b>
<i>Glutensiz Bisküvi Üretiminde Hingedan (<i>Ferula pseudalliacea</i>) Kullanımı</i>	
<b>Sezen ÖZCELİK ve Rojbin GÖR</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>R290 Refrigerant Performance in a Commercial Refrigerator .....</b>	<b>157</b>
<i>Ticari Buzdolabında R290 Soğutucu Akışkan Performansı</i>	
<b>Turhan SARAÇ ve Mahmut ÜNALDI</b>	
<b>Load Balance Forecasting Based on Hybrid Deep Neural Network .....</b>	<b>167</b>
<i>Hibrit Derin Sinir Ağına Dayalı Yük Dengesi Tahmini</i>	
<b>Hajir KHALAF ve Nezihe YILDIRAN</b>	
<b>Climbing with Robots: A Second Order Controller Design for Accurate Wheel Motion Positioning .....</b>	<b>175</b>
<i>Tırmanma Robotları: Hassas Tekerlek Konumlandırması için İkinci Dereceden Kontrolör Tasarımı</i>	
<b>Claudia Fernanda YAŞAR</b>	
<b>Foeniculum Vulgare Ekstraktının Altuzan İlacı Kombinasyonu ile A549 Akciğer Kanseri Hücrelerine Karşı Antikanser Etkileri .....</b>	<b>189</b>
<i>Anticancer Effects of Foeniculum Vulgare Extract with Altuzan Drug Combination Against A549 Lung Cancer Cells</i>	
<b>Kübra KELLEÇİ, Eda GÖZEBATMAZ, Murat IHLAMUR ve Emrah Şefik ABAMOR</b>	
<b>Evrişimli Sinir Ağı (ESA) Mimarileri ile Hücre Görüntülerinden Sıtmanın Tespit Edilmesi.....</b>	<b>197</b>
<i>Detection of Malaria with Convolutional Neural Network (CNN) Architectures Using Cell Images</i>	
<b>Yıldırım ÖZÜPAK</b>	
<b>Physical and Chemical Properties of a New Cellulose Fiber Extracted from the <i>Mentha pulegium</i> L. (Pennyroyal) Plant's Stem .....</b>	<b>211</b>
<i>Yaban Nanesi (Yarpuz) Bitkisinin Gövdesinden Ekstrakte Edilmiş Yeni Bir Selülozik Lifin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri</i>	
<b>Sabih OVALI ve Oğuz ERYILMAZ</b>	
<b>Kuru Derelerde Taşkın Risk Analizi; Kebendibi Deresi Örneği.....</b>	<b>221</b>
<i>Flood Risk Analysis in Dry Streams; Kebendibi Stream Example</i>	
<b>Gözde ALTIN, Saygın TAŞKIN, Recep YURTAL ve M.Sami AKÖZ</b>	
<b>Gender Classification through Fusion of Holistic and Region-based Facial Patterns.....</b>	<b>231</b>
<i>Bütünsel ve Bölge Bazlı Yüz Kalıplarının Birleştirilmesi Yoluyla Cinsiyet Sınıflandırması</i>	
<b>Maryam ESKANDARI (Meryem ŞEERİFİ)</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Yukarı Ceyhan Havzasındaki Heyelanların Dağılımının ve Karakteristiğinin Belirlenmesi .....</b>	<b>239</b>
<i>Determination of Landslide Distribution and Characteristics in the Upper Ceyhan Basin</i>	
<b>Mehmet Emin CİHANGİR</b>	
<b>İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek (Adana) Arasında Kalan Topraklardaki Ağır Metal İçeriklerinin Zenginleşme Faktörüne Göre Değerlendirilmesi.....</b>	<b>251</b>
<i>Evaluation of Heavy Metal Contents in Soils Between İmamoğlu, Dilekkaya and Mercimek (Adana) According to Enrichment Factor</i>	
<b>Mustafa AKYILDIZ ve Fatimah SULEIMAN</b>	
<b>Vaporizing Foil Actuator Welding Arc Problems and Precautions .....</b>	<b>261</b>
<i>Buharlaştırılmış Folyo Aktüatör Kaynağı Ark Problemleri ve Önlemleri</i>	
<b>Ganime Tuğba ÖNDER ve Mustafa Kemal KÜLEKÇİ</b>	
<b>Türkiye'deki Depreme Dayanıklı Betonarme Çerçevesel Bina Tasarımına Retrospektif Bir Bakış .....</b>	<b>271</b>
<i>A Retrospective View on Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Frame Structures in Türkiye</i>	
<b>Alper ALDEMİR; Barış ERDİL ve Ömer Burak YÜCEL</b>	



## Momordica Charantina Ekstraktının Amfotericin B ve Miltefosin İlaç Kombinasyonları ile Leishmania Parazitleri Üzerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi

**Kübra KELLEÇİ<sup>1,2</sup>** ORCID 0000-0002-9409-2254

**Murat IHLAMUR<sup>1,3</sup>** ORCID 0000-0002-0458-5638

**Melisa ÖZKAN<sup>1</sup>** ORCID 0000-0002-5899-6037

**Emrah Şefik ABAMOR<sup>1</sup>** ORCID 0000-0002-9174-4528

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya- Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul

<sup>2</sup>Beykoz Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikleri Bölümü, İstanbul

<sup>3</sup>Biruni Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 07.08.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: KELLEÇİ, K., IHLAMUR, M., ÖZKAN, M., ABAMOR, E.Ş., (2024). Momordica Charantina Ekstraktının Amfotericin B ve Miltefosin İlaç Kombinasyonları ile Leishmania Parazitleri Üzerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 1-7.

### Öz

Leishmaniasis, Leishmania parazitlerinin neden olduğu tropikal bir hastalıktır. Halk arasında “kala-azar” olarak bilinen, hastalığın en ölümcül formu olan viserial leishmaniasise (VL) *L. infantum*’un neden olduğu bilinmektedir. Piyasada hali hazırda antileishmanial ajanlar mevcuttur, ancak bu kemoterapötik ajanların toksisitelerinin ve yan etkilerinin olduğu bilinmektedir. Şifalı bitkiler ve onların ekstraktlarına olan ilgi, yan etkilerinin yok denecek kadar az olmasıyla her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada leishmaniasise yönelik etkin bir ilaç formülasyonu geliştirmek için, zengin kimyasal içeriğe sahip, anti-leishmanial özellik sergileyen kudret narı (*Momordica charantina*) özütleri kullanılmıştır. Çalışmada kudret narı ekstraktları tek başına ve farklı antileishmanial ilaçlarla (Amfotericin B ve miltefosin) kombine edilerek RAW 264.7 makrofaj hücrelerinde sitotoksik etkisi araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen ekstrakt-ilaç formülasyonlarının *L. infantum* parazit hücreleri üzerindeki öldürücü etkinliği de MTT analiz yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen verilere göre ekstraktın tek başına toksik etkisinin olmadığı, ilaçla kombine edildiği zaman doğal immün sistem hücreleri üzerinde ilacın toksik etkisini azalttığı, leishmania parazitleri üzerinde ise sitotoksik etkisini arttırdığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların VL karşı tedavi yaklaşımının geliştirilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Leishmania infantum, Momordica charantina, Sitotoksisite, Antileishmanial

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Kübra KELLEÇİ, [kubragkelleci@gmail.com](mailto:kubragkelleci@gmail.com)

## **Investigation of the Cytotoxic Effects of Momordica Charantina Extract on Leishmania Parasites with Amphotericin B and Miltefosine Drug Combinations**

### **Abstract**

Leishmaniasis is a tropical disease caused by Leishmania parasites. It is known that *L. infantum* causes visceral leishmaniasis (VL), which is the deadliest form of the disease, popularly known as "kala-azar". Antileishmanial agents are already available in the market, but these chemotherapeutic agents are known to have toxicities and side effects. Interest in medicinal plants and their extracts is increasing day by day, with almost no side effects. In this study, bitter melon (*Momordica charantina*) extracts with rich chemical content and exhibiting anti-leishmanial properties were used to develop an effective drug formulation for leishmaniasis. In the study, the cytotoxic effect of bitter melon extracts alone or in combination with different antileishmanial drugs (Amphotericin B and miltefosine) was investigated in RAW 264.7 macrophage cells. In addition, the lethal activity of the obtained extract-drug formulations on *L. infantum* parasite cells was also investigated by MTT analysis method. According to the data obtained from the study, it was determined that the extract did not have a toxic effect alone, when combined with the drug, it reduced the toxic effect of the drug on the cells of the innate immune system, and increased the cytotoxic effect on the leishmania parasites. It is thought that the results obtained will help to develop a treatment approach against VL.

**Keywords:** Leishmania infantum, Momordica charantina, Cytotoxicity, Antileishmanial

### **1. GİRİŞ**

Bitkiler binlerce yıldır farklı medeniyetler tarafından, halk arasında geleneksel tedavi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitkilerin hemen hemen bütün kısımlarında farklı düzeylerde bulunan fenolik bileşikler sayesinde antialerjen, antimitojen, antikarsinojen, antihipertansif, antikolesterol, antiinflamatuar, antitrombotik, vasodilatör ve sakinleştirici özelliklere sahip oldukları bildirilmektedir [1].

Cucurbitaceae familyasına ait bir tür olan kudret narı (*Momordica charantina*) bugün sadece geleneksel tıpta kullanımı nedeniyle halkın değil aynı zamanda tıbbi ve gıda endüstrisinde kullanımı ile de araştırmacıların ilgisini çekmektedir. İçeriğinde bulunan fenolik bileşikler sayesinde antidiyabetik, antiviral, anti-inflamatuar, antiparazitik özelliğe sahip olduğu kanıtlanmıştır [2].

Yapılan çalışmalar bitkinin sahip olduğu kimyasal bileşen düzeyinin, bitkinin olgunluk seviyesine, bitkinin kısımlarına ve ekstraksiyonda kullanılan çözücüye bağlı olduğunu göstermiştir [3]. Kudret

narı günümüzde birçok hastalığın tedavisinde kullanılmakla birlikte son yıllarda ülkemizde artan leishmaniasis hastalığının tedavisine yönelik çalışmalarda da kullanılmaya başlanmıştır [4].

Leishmaniasis, Phlebotomus cinsi sineklerden bulaşan paraziter bir hastalıktır. Hastalığın en ölümcül formu olan viseral leishmaniasis (VL)'e *L. infantum*, *L. tropica* ve *L. donovani* türlerinin neden olduğu bilinmektedir [5]. VL'nin tedavisinde genellikle kemoterapi ilaçları ile sağlanmaktadır. Deoksikolat veya lipozomal formülasyonlarda hazırlanan amfoterisin B, paromomisin ve miltefosin dahil olmak üzere yeni ilaçlar geliştirilmiş olsa da bu ilaçlar ciddi toksik ve yan etkilere neden olmakta, ilaç direncini arttırmaktadır [6]. Bu nedenle antileishmanial ilaçların geliştirilmesine acilen ihtiyaç vardır [7].

Yapılan literatür çalışmaları tedavide kimyasal ilaçlara ek olarak bitkisel kaynaklı ekstrakt kullanılması ilacın etkinliğini artırabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle birçok bitki ekstraktının leishmaniasis tedavisinde kullanımı araştırılmıştır [8]. Yapılan çalışmalarda kudret narının içeriğinde bulunan Momordicatin adlı bileşiğin *L. donovani*

üzerinde etkili bir ajan olduğu kanıtlanmıştır [9]. Bitkideki Momordicatin adlı bu bileşiğin leishmaniasis tedavisinde kullanılan ilaçlarla kombinasyonunun olumlu bir etki oluşturacağı düşünülmektedir. Kombinasyon tedavisi son zamanlarda anti-leishmanial ilaçların dezavantajlarını minimize etmek için en çok araştırılan alanlardan biri olmuştur [6]. Bu çalışmada kudret narı ekstraktı tek başına ve leishmaniasis tedavisinde sıklıkla kullanılan ilaçlar ile kombine edilerek leishmania parazitlerindeki toksisitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kudret narı ekstraktının anti-leishmanial aktivitesi tespit edilmeden önce toksik olmayan konsantrasyonları RAW 264.7 makrofaj hücre hattı kullanılarak belirlenmiştir.

## 2. YÖNTEM

RPMI-1640, Fetal bovin serum (FBS), Dimetilsulfoxid (DMSO), gentamisin, filtre kâğıdı (Hoffmann) ve 0.22 µm filtrelerin tümü Sigma-Aldrich'ten satın alındı. Tüm sulu çözeltiler milli-Q su ile hazırlandı. Morfolojik değişiklikleri gözlemek amacıyla ters mikroskop (Olympus CKX 41) kullanıldı.

### 2.1. Kudret Narı Ekstraktının Hazırlanması

*M. charantia* yerel pazardan temin edilmiştir. Olgun kudret narı uygun şekilde distile su ile yıkandı, meyvelerin içinde yer alan tohumlar temizlendikten sonra meyveler küçük parçalara ayrıldı. Mikroalgada kurutularak toz haline getirilen kudret narından 8 gr tartılıp, üzerine 50 ml metanol eklendi. 6 gün karanlık ortamda oda sıcaklığında inkübe edildikten sonra elde edilen özüt, Whatman No.1 filtre kâğıdı kullanılarak süzüldü ve metanol hava akımı ve sıcaklık yoluyla buharlaştırıldı. Kudret narı ekstraktının miktarı hesaplandı [10].

### 2.2. Parazit ve Hücre Kültürü

Bu çalışmada laboratuvarımızdaki kriyobankta bulunan RAW.264.7 makrofaj hücresi ve VL etmeni olan *L.infantum* paraziti kullanıldı.

Hücrelerin ve parazitlerin proliferasyonu için RPMI-1640 besiyeri içerisine %1 gentamisin, %1 L-glutamin ve %10 FBS ilave edilerek, 37°C, %95 nem ve %5 CO<sub>2</sub> inkübe edildi.

Makrofaj hücreleri %80-90 konfluente ulaştıktan sonra fiziksel yol ile toplanarak 1000 rpm'de 5 dk süreyle santrifüj edildi [11]. Laboratuvar kriyobankında mevcut olan *L.infantum*, RPMI-1640 besiyerinde 27°C, karbondioksitsiz etüvde inkübe edildi. 25 cm<sup>2</sup>'lik flasklara 3x10<sup>5</sup> parazit/ml olacak şekilde kültürden parazit ekimi yapıldı. 25 cm<sup>2</sup>'lik flaskta 10<sup>7</sup> parazit/ml sayısına ulaştığında *L.infantum* promastigotları 75 cm<sup>2</sup>'lik flaska aktararak 48 saat boyunca inkübe edildi. Parazitler gerekli konfluente ulaşan parazitler 96 kuyulu plaklara 2x10<sup>6</sup> parazit/ml olacak şekilde ekilerek 27°C de karbondioksitsiz ortamda 24 saat boyunca tutuldu [12].

### 2.3 Sitotoksosite Analizleri

Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan ekstrakt, ilaç (10 -100 µg/ml), ve ekstrakt+ilaç (40 µg/ml ekstrakt ve 10 -100 µg/ml ilaç) formülasyonlarının sitotoksitesini belirlemek için MTT yöntemi kullanıldı. Parazitlerin canlılığı, 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-Difeniltetrazilyum bromür ile değerlendirildi. Plakalara fenol-red içermeyen besiyerinde ekilen parazitlere (2x10<sup>6</sup> parazit/ml) ekstrakt, ilaç ve ekstrakt+ilaç formülasyonları eklenerek CO<sub>2</sub> içermeyen 27°C'lik inkübatörde 48 saat inkübe edildi. İnkübasyondan sonra her kuyucuğa 10 µl MTT solüsyonu ilave edilerek CO<sub>2</sub>'siz etüvde 27°C'de 3 saat inkübe edildi. İnkübasyon sonunda kuyucuklara 100 µl DMSO ilave edilerek plakalar 30 dakika karanlıkta tutuldu [13].

Parazitlerin canlılık analizi 570 nm dalga boyunda ölçüldü. Her deney grubu üç kez tekrarlandı ve ortalaması alındı. Hücre canlılığı Denklem 1 kullanılarak, 48 saat sonunda elde edildi.

$$\text{Hücre Canlılığı (\%)} = \left( \frac{\text{Örnek absorbanansı}}{\text{Kontrol absorbanansı}} \right) * 100 \quad (1)$$

## 2.4. İstatistiksel Analiz

Çalışmadan elde edilen veriler IBM SPSS 25.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, ABD) paket programında analiz edilmiştir. Gruplar arası karşılaştırmalar tek yönlü varyans analizi Tek Yönlü ANOVA testi ile yapılmıştır. Sonuçlar ortalama±standart sapma olarak verildi ve istatistiksel anlamlılık  $p < 0,05$  olarak kabul edildi.

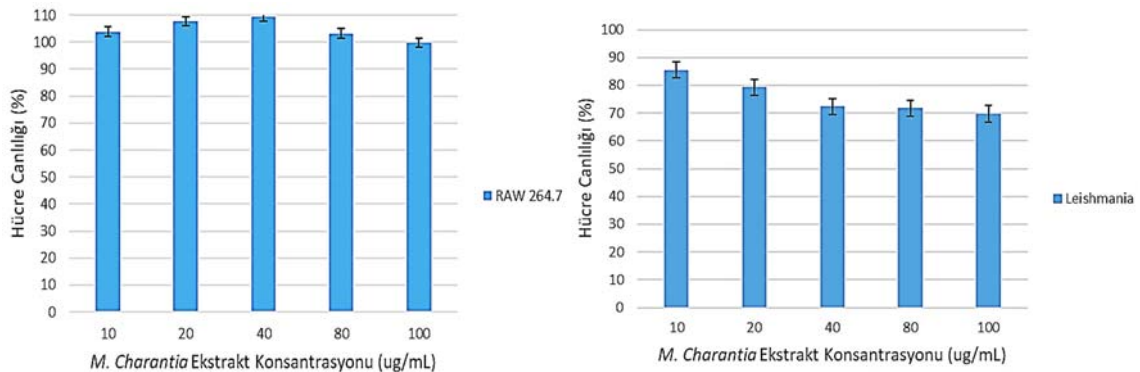
## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bitkilerdeki ikincil metabolitler, fenolik asitler, flavonoidler, tanenler, kinonlar, antosiyaninler gibi birçok aktif bileşiğin anti-leishmanial etkinliği olduğu bilinmektedir [14]. Bu çalışmada maserasyon yöntemi ile hazırlanan kudret narı ekstraktının anti-leishmanial aktivitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan ekstrakt ve anti-leishmanial ilaçlar ile yapılan kombinasyonların RAW 264.7 makrofaj hücrelerinde ve *L. infantum* parazitlerinde toksisiteyi tespit edilmiştir. *In vivo* çalışmalarda denenmek üzere leishmaniasis tedavisinde uygulama potansiyeli en yüksek olan ekstrakt-ilaç kombinasyonu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada ekstraktın en yüksek öldürme etkinliğinin 100 µg/ml konsantrasyonda elde edildiği görülmektedir. Fakat bu konsantrasyon Şekil 1’de gösterildiği gibi RAW 264.7 hücrelerine uygulandığında yüksek sitotoksosite gösterdiği için değerlendirilmemiştir.

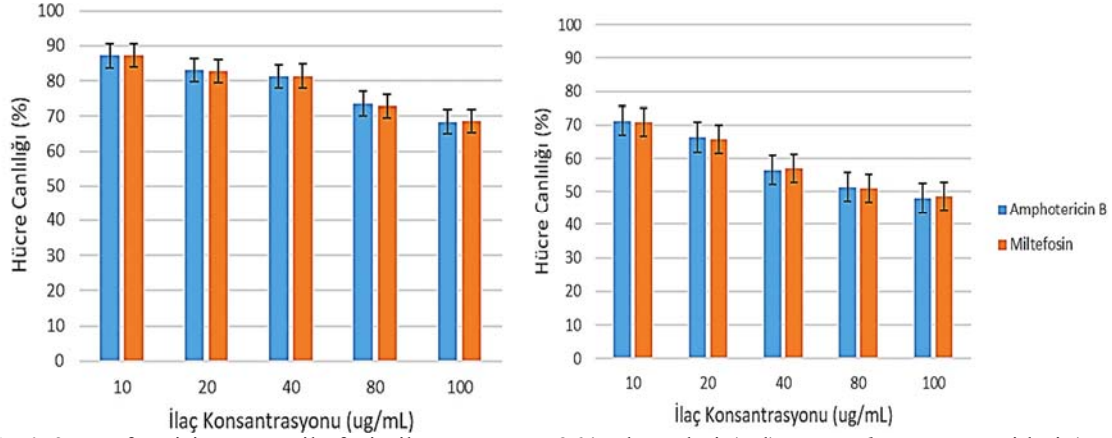
40 µg/ml konsantrasyondaki ekstraktın sitotoksosite analizi incelendiğinde RAW 264.7 hücrelerinde %

109,44 canlılık tespit edilirken, Leishmania parazitlerinde %72,36 canlılık tespit edilmiştir. Ekstraktın artan konsantrasyonla birlikte Leishmania parazitlerini öldürme kabiliyetinin arttığı görülmektedir. Kudret narı ekstraktının sitotoksik etkinliği en yüksek 40 µg/ml konsantrasyonda olduğu için ilaç kombinasyonları bu konsantrasyon ile uygulanmıştır. Kudret narı ekstraktının Amfoterisin B ve miltefosin ilacı ile kombinasyonun RAW 264.7 hücrelerinde ve Leishmania parazitlerindeki sitotoksik etkinliği Şekil 2’de gösterilmiştir. RAW 264.7 hücrelerinde 40 µg/ml Amfoterisin B uygulandığında %81,27 canlılık, 40 µg/ml miltefosin ilacı uygulandığında ise %81,29 canlılık tespit edilmiştir. Aynı konsantrasyonda Leishmania parazitlerine Amfoterisin B uygulandığında %56,47 canlılık, miltefosin uygulandığında ise %57,03 canlılık tespit edilmiştir.

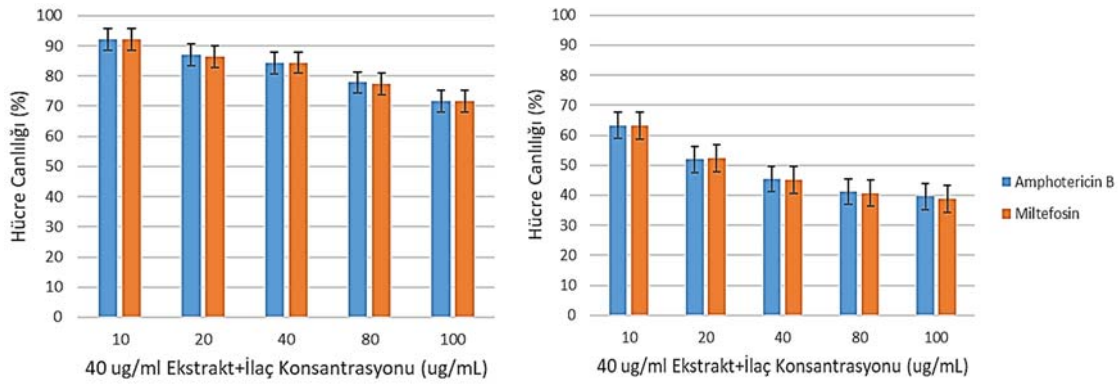
Kudret narı ekstraktının Amfoterisin B ve miltefosin ilacı ile ayrı ayrı kombinasyonunda, RAW 264.7 hücrelerinde 40 µg/ml ekstrakt+40 µg/ml Amfoterisin B ilacının %84,26 canlılığa, 40 µg/ml ekstrakt+40 µg/ml miltefosin ilacının ise %84,45 canlılığa neden olduğu bulunmuştur (Şekil 3). Aynı şekilde ekstrakt+ilaç kombinasyonlarının Leishmania parazitleri üzerine sitotoksik etkileri de yer almaktadır. Sonuçlara göre 40 µg/ml ekstrakt+40 µg/ml Amfoterisin B ilacı uygulandığında %45,36 canlılık, 40 µg/ml ekstrakt+40 µg/ml miltefosin ilacı uygulandığında ise %45,13 canlılık tespit edilmiştir.



Şekil 1. Ekstraktın RAW 264.7 hücre hattı ve Leishmania parazitindeki sitotoksitesisi



Şekil 2. Amfoterisin B ve miltefosin ilacının RAW 264.7 hücreleri (sol) ve *Leishmania* parazitleri (sağ) üzerindeki sitotoksitesisi



Şekil 3. Amfoterisin B ve miltefosin ilacının kudret narı kombinasyonlarıyla RAW 264.7 hücreleri (sol) ve *Leishmania* parazitindeki (sağ) sitotoksik etkileri

Leishmaniasis tedavisinde kullanılan ilaçlar *Leishmania* parazitlerinin öldürülmesini sağlamaktadır. Fakat mevcut ilaçların tek başına kullanımlarının sitotoksik etki oluşturmaları ve istenilen etkinlik düzeyinde olmamaları gibi dezavantajları vardır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla leishmaniasis tedavisinde kullanılan ilaçların bitkisel ekstraktlarla kombine olarak kullanımının, ilaçların toksisitelerini azalttığı ve anti-leishmanial etkilerini artırdığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürü desteklemektedir [15]. Yapılan bir çalışmada *P. granatum* ekstraktının anti-leishmanial aktivitesi incelenmiştir. *L. infantum* ve *L. major* parazitlerinde *P. granatum* ekstraktının IC<sub>50</sub> değerleri sırasıyla 0,84 ve 1,67 µM olarak bulunduğu bildirilmiştir

[16]. Sonuçlar referans ilaç miltefosin değerleriyle karşılaştırıldığında, *P. granatum* ekstraktının *L. infantum* parazitlerinde miltefosine göre yaklaşık 25 kat daha seçici olduğu rapor edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Beş değerlikli antimoniyaller, ölümcül olduğu bilinen VL tedavisi için ilk ilaç grubu olarak kabul edilmektedir [17]. Bazı parazitik suşlar bu klasik beş değerlikli antimonlara karşı direnç geliştirmiştir [18]. Piyasada sıklıkla kullanılan Miltefosin, Amfoterisin B ilaçları VL tedavisi için etkili olduğu bilinmektedir. Fakat ne yazık ki kesin çözüm değildir. Bu ilaçların kullanımı ile hastalarda kutanöz leishmaniasis ya da yeniden VL tekrarlama

durumu söz konusudur. Ayrıca ilaçların sahip olduğu yan etkiler ve toksisite gibi zararları da ilaçların kullanımını sınırlamaktadır. Dolayısıyla VL tedavisi için yeni ilaçların geliştirilmesine acil ihtiyaç vardır [19].

Paraziter hastalıkların tedavisinde şifalı bitkilerin ve bitki ekstraktlarının kullanımı geçmiş zamanlardan beri sıklıkla çalışmalara araştırma konusu olmuştur [16]. Bugüne kadar, halk arasında kudret narı olarak da bilinen *M. charantia* bitkisi ve bitki özütü ile yapılan pek çok *in vivo* ve *in vitro* çalışma vardır. *M. charantia* bitkisinin antidiyabetik, antiparaziter, antimikrobiyal pek çok faydalı etkisi olduğu literatürde yapılan çalışmalarda görülmektedir [2].

Bu çalışma kapsamında kudret narı ekstraktının RAW 264.7 makrofaj hücre hattında sitotoksik etkinliği araştırılmıştır. Aynı zamanda *L. infantum* parazitleri üzerindeki öldürücü etkisi de incelenmiştir. Çalışmada bitki ekstraktı tek başına kullanıldığında doğal immün sistem hücreleri üzerinde toksik etkisinin olmadığı fakat *Leishmania* parazitleri için toksik etki yarattığı belirlenmiştir. *Leishmania* parazitleri üzerindeki etkiyi artırmak ve mevcut anti-leishmanial ilaçların toksik etkisini minimize etmek için, ilaç+ekstrakt kombinasyonu uygulanmıştır. Elde edilen veriler ışığında kudret narı ekstraktlarının ilaçların doğal immün sistem hücreleri üzerinde toksik etkisini azalttığı, *Leishmania* parazitleri üzerinde ise toksik etkisini arttırdığı belirlenmiştir. Bu çalışma ile kudret narının leishmaniasis tedavilerinde kullanılma potansiyeli olan antileishmanial özelliklerinin olduğu belirlenmiştir.

Bu bulgular ışığında leishmaniasis tedavisinde kudret narının etkili sonuçlar verse de tek başına yeterli olmayacağı ve antileishmanial ilaçlarla kullanıldığı zaman ilaçların toksik etkilerini azaltarak antileishmanial etkilerini arttırdığı belirlenmiştir. Kudret narı ile Amfotericin B ve Miltefosin gibi antileishmanial ilaçların kombinasyonlarının leishmania tedavisinde kullanım potansiyellerinin olduğunu ve *in vivo* çalışmalarla bitkisel ekstrakt+ilaç formülasyonlarının leishmaniasis tedavilerinde etkili sonuçlar vereceğini düşünmekteyiz.

## 5. KAYNAKLAR

1. Bortolotti, M., Mercatelli, D., Polito, L., 2019. *Momordica charantia*, a Nutraceutical Approach for Inflammatory Related Diseases. *Front Pharmacol*, 10, 486.
2. Wang, S., Li, Z., Yang, G., Ho, C. T., Li, S., 2017. *Momordica charantia*: A Popular Health-Promoting Vegetable With Multifunctionality. *Food Funct*, 8(5), 1749-1762.
3. Jia, S., Shen, M., Zhang, F., Xie, J., 2017. Recent Advances in *Momordica charantia*: Functional Components and Biological Activities. *Int J Mol Sci*, 18(12), 2555.
4. Gupta, S., Raychaudhuri, B., Banerjee, S., Das, B., Mukhopadhyaya, S., Datta, S.C., 2010. *Momordicatin Purified From Fruits of Momordica charantia* is Effective to Act as a Potent Antileishmania Agent. *Parasitol Int*, 59(2), 192-197.
5. Torres-Guerrero, E., Quintanilla-Cedillo, M.R., Ruiz-Esmenjaud, J., Arenas, R., 2017. *Leishmaniasis*: A Review. *F1000Res*, 6, 750.
6. Kelleci, K., Allahverdiyev, A., Bağırova, M., İhlamur, M., Abamor, E.Ş., 2023. Particulate and Non-Particle Adjuvants in *Leishmaniasis* Vaccine Designs: A Review. *Journal of Vector Borne Diseases*, 60(2), 125-141.
7. Kelleci, K., 2022. Determination of Immunostimulatory Efficacy of Benzimidazole Derivatives Against *Leishmania infantum*. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 13(12), 11.
8. Monzote, L., Piñón, A., Setzer, W.N., 2014. Antileishmanial Potential of Tropical Rainforest Plant Extracts. *Medicines*, 1(1), 32-55.
9. Saeed, F., Afzaal, M., Niaz, B., Arshad, M., Tufail, T., Hussain, M., Javed, A., 2018. Bitter Melon (*Momordica charantia*): A Natural Healthy Vegetable. *International Journal of Food Properties*, 21.
10. Horax, R., Hettiarachchy, N., Chen, P., 2010. Extraction, Quantification, and Antioxidant Activities of Phenolics from Pericarp and Seeds of Bitter Melons (*Momordica charantia*) Harvested at Three Maturity Stages (Immature, Mature, and Ripe). *J Agric Food Chem*, 58(7), 4428-4433.

11. Philippeos, C., Hughes, R.D., Dhawan, A., Mitry, R.R., 2012. Introduction to Cell Culture. *Methods Mol Biol*, 806, 1-13.
12. Castelli, G., Galante, A., Lo Verde, V., Migliazzo, A., Reale, S., Lupo, T., Bruno, F., 2014. Evaluation of Two Modified Culture Media for *Leishmania infantum* Cultivation Versus Different Culture Media. *J Parasitol*, 100(2), 228-230.
13. Guevara, I., Iwanejko, J., Dembińska-Kieć, A., Pankiewicz, J., Wanat, A., Anna, P., Szczudlik, A., 1998. Determination of Nitrite/Nitrate in Human Biological Material by The Simple Griess Reaction. *Clin Chim Acta*, 274(2), 177-188.
14. Poddar, S., Sarkar, T., Choudhury, S., Chatterjee, S., Ghosh, P., 2020. Indian Traditional Medicinal Plants: A Concise Review. *International Journal of Botany Studies*, 5(5), 174-190.
15. Oryan, A., 2015. Plant-Derived Compounds in Treatment of Leishmaniasis. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 16(1), 1.
16. Kelleci, K., 2023. In Vitro Anticarcinogenic, Antiparasitic and Antimicrobial Effects of *P. granatum* Extract. *Biology Bulletin Reviews*, 13(Suppl 3), 264-269.
17. Haldar, A.K., Sen, P., Roy, S., 2011. Use of Antimony in the Treatment of Leishmaniasis: Current Status and Future Directions. *Mol Biol Int*, 2011, 1-23.
18. Jédi, F., Piarroux, R., Mary, C., 2011. Antimony Resistance in *Leishmania*, Focusing on Experimental Research. *J Trop Med*, 2011, 1-15.
19. Kelleci, K., Gölebatmaz, E., 2023. In Vitro Determination of Antileishmanial Activities of Benzimidazolium Derivatives on *L. major* Promastigotes and Amastigotes. *Acta Parasitologica*, 68(1), 51-55.





## M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi

Ahmet ÖZCAN<sup>1</sup> ORCID 0009-0004-4323-2079

Celalettin YÜCE\*<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-1387-907X

<sup>1</sup>Ulaşım İç ve Dış Ticaret Anonim Şirketi, Ar-Ge Merkezi, Bursa

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

Geliş tarihi: 01.01.2024

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ÖZCAN, A., YÜCE, C., (2024). M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 9-22.

### Öz

Dünya çapında ve ülkemizde yürütülen çalışmalar, taşıtların yaşam döngüsü boyunca enerji verimliliği konusunu, sera gazı salınımindaki artış ve enerji kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak, hammadde aşamasından geri dönüştürülme süreçlerine kadar önemli bir öncelik haline getirmiştir. Özellikle uzun mesafeli yolculuklara hizmet eden toplu taşıma araçları için taşıt ağırlığını azaltmak, yakıt tasarrufunu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu taşıtların prototip imalata geçmeden önce sonlu elemanlar analizleri ile doğrulama süreçlerinin gerçekleştirilmesi maliyet ve zaman avantajı sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer toplu taşıma araçlarının sonlu elemanlar modeli kurularak farklı yöntemler ile incelenmiştir. Ancak sonlu elemanlar modelinin sadece gövde üzerinde oluşturulduğu modellerde gövde karkasına etkileyen kuvvetlerin tam anlamıyla temsil edilemediği görülmüştür. Tüm bunlarla beraber literatürde yapılan çalışmalar genel olarak ticari bir tasarımı içermemekte ve yerleşim planı ve teknik özelliklerin detaylı incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için otobüs gövdesi, akslar dahil olmak üzere tamamını içerecek şekilde modellendi ve hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme ve ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirildi. Yapılan analizler sonucunda gövde karkasında bazı yapısal değişikliklere gidilmiş ve araç ağırlığı azaltılmıştır. Yeni tasarım tekrar aynı sınır şartlarında analiz edilerek doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım değişiklikleri sonrasında gövde karkasında sol duvar bölgesinde 19,694 kg, sağ yan duvar bölgesinde 17,346 kg, tavan bölgesinde 72,43, şasi ve diğer bölgelerde ise 122,53 kg'lık bir kütle tasarrufu sağlanarak toplamda %7,41 oranında bir hafifletme sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli otobüs, Yapısal analiz, İvmelenme, Hafifletme

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Celalettin YÜCE, [cyuce@uludag.edu.tr](mailto:cyuce@uludag.edu.tr)

## Lightweighting of an M3 Class Electric Bus Under Different Scenarios with Finite Element Analysis

### Abstract

Studies carried out worldwide and in our country have made the issue of energy efficiency throughout the life cycle of vehicles an important priority, from the raw material stage to the recycling processes, due to the increase in greenhouse gas emissions and the decrease in energy resources. Reducing vehicle weight significantly increases fuel economy, especially for public transportation vehicles that serve long-distance journeys. Carrying out verification processes with finite element analyzes of these vehicles before proceeding with prototype manufacturing provides cost and time advantages. When the studies in the literature are examined, finite element models of similar public transportation vehicles have been established and examined with different methods. However, it has been observed that the forces acting on the body frame cannot be fully represented in models where the finite element model is created only on the body. In addition to all this, the studies in the literature generally do not include a commercial design and it seems that the layout plan and technical features are not examined in detail. In this study, to examine the behavior of an M3 class electric bus under operating conditions, the bus was modeled including the entire body, including the axles, and structural analyzes were carried out in the three scenarios to which it is most exposed in motion: 1G acceleration at full load, lateral acceleration and sudden braking and acceleration scenarios. As a result of the analysis, some design changes were made to the body frame and the vehicle weight was reduced. The new design was analyzed again under the same boundary conditions and a verification study was carried out. After the design changes, a mass saving of 19.694 kg in the left wall region of the body frame, 17.346 kg in the right side wall region, 72.43 kg in the ceiling region, and 122.53 kg in the chassis and other regions was achieved, resulting in a weight reduction of 7.41%.

**Keywords:** Electric bus, Structural Analysis, Acceleration, Lightweighting

### 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji kaynaklarındaki daralma ve küresel ısınma gibi faktörler tüm endüstriyel alanlarda enerji verimliliğini arttırmayı öncelikli hedef haline getirmiştir. Günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan ulaşım faaliyeti de sürdürülebilir çevre kavramını doğrudan etkilemektedir. Özellikle karayolu taşımacılığı ulaştırma sektörü içerisinde önemli bir yere sahiptir. Avrupa Birliği'nde (AB) 2020 yılında kişi başına yaklaşık 10.000 km yol motorlu ulaşım araçları ile kat edilmiş ve bu hareketliliğin %80,6'lık kısmı binek otomobiller ile %6,6'lık kısmı yolcu otobüsleri ve %5'ü ise demiryolu ile gerçekleşmiştir [1].

Ülkemizde ve dünya genelinde yapılan araştırmalar, sera gazı salımındaki artışı ve enerji kaynaklarındaki azalmaya bağlı olarak taşıtların yaşam döngüsü boyunca hammadde aşamasından

geri dönüştürülmesine kadar olan süreçlerde enerji verimliliği önemli bir öncelik haline gelmiştir [2]. Taşıtlarda enerji verimliliğini artıran teknolojiler arasında, araç ağırlığını hafifletme yöntemi önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, yakıt tüketiminde düşüş sağlamanın yanı sıra aracın ömrü boyunca salgılanan emisyon oranlarında da azalmaya neden olur [3]. Yapılan araştırmalar değişik taşıtlarda, farklı kullanım çeşitlerine ve kullanım miktarlarına bağlı olarak taşıtlarda her 100 kg'lık hafifletmenin 100 km mesafede ortalama 0,3-0,4 L yakıt tasarrufu sağlayacağını ortaya koymuştur. Farklı bir açıdan bakıldığında taşıtın %10 hafifletilmesi ile yakıt ekonomisinde %2-9 oranında iyileşme sağlayacaktır [4]. Taşıt ağırlığında elde edilecek hafifletmeler hibrit ve elektrikli araçların menzilleri açısından da önemlidir [5]. Özellikle uzun seyahat mesafelerine hizmet eden toplu taşıma araçları için taşıt ağırlığının azaltılması, önemli ölçüde yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Emisyonları azaltmanın yanı sıra kat edilen her kilometre başına düşen yakıt

tüketimini azaltmak, bu sektörde karlılığın kilit bir unsuru olup, maliyetleri de düşürmektedir [6].

Aracın güvenlik beklentilerinden ödün vermeden ağırlığını azaltmak için yeni malzemelerin kullanılmasının yanı sıra parçaların optimizasyon teknikleri ile yeniden tasarlanıp yeni üretim teknikleri ile üretilmesi gerekmektedir. Bu süreçte sonlu elemanlar analizleri önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle toplu taşıma araçlarında prototip imalatların gerçekleştirilmesinden önce sonlu elemanlar analizleri yeni tasarımların doğrulama süreçleri oldukça hızlı ve düşük maliyetli gerçekleştirilebilir. Literatürde birçok araştırmacı sonlu elemanlar analizleri ile özellikle otobüslerin yapısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Arslan ve Solmaz (2018) 12 metre uzunluğundaki bir yolcu otobüsünün yapısal analizlerini gerçekleştirmiş ve karkas yapısındaki maksimum gerilme değerinin profillerin birbirine bağlandığı noktalarda oluştuğunu belirtmişlerdir [7]. Karamert ve Demir (2022) bir otobüs gövde yapısında topoloji optimizasyonu uygulayarak profil örgü yapısını bu optimizasyon sonuçlarına uygun olarak revize etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar analizlerinde gövde katılık değerleri optimizasyon çalışmasında korunması gereken kriter olarak kabul belirlenmiştir. Gövde karkasının rijitlik değerleri ölçülmüş ve yeni tasarımda yaklaşık %9 oranında bir hafifletme elde etmişlerdir [8]. Jung ve arkadaşları (2020) bir elektrikli otobüsün tavan yapısının hafifletilmesi için çok malzemeli topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [9]. Kongwat ve arkadaşları (2020) ECE-R66 standardı ile uyumlu olarak gerilme, rijitlik ve devrilme performansı açısından otobüs karkasını incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri topoloji optimizasyonu ile yaklaşık %2,5 oranında bir hafifletmenin mümkün olduğunu açıklamışlardır [10]. Raj ve arkadaşları (2020) otobüs gövdesini dört farklı senaryo altında (yerçekimi ivmesinin etkisi, frenleme etkisi, 2g ivme etkisi ve darbe yükünün etkisi) statik ve dinamik olarak analiz etmişlerdir [11]. Fu ve arkadaşları (2019) bir elektrikli otobüs gövde yapısında optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon hedefi olarak toplam kütleyle en aza

indirmeyi belirlemişler ve buna karşılık eğilme, burulma rijitliğini, eğilme ve burulma frekansı kısıt olarak belirlenmiştir [12]. Croccolo ve arkadaşları (2011) bir şehir içi otobüsün şasi sistemini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişler ve çalışma şartlarında şasinin maruz kaldığı yüklenme koşullarında gerilme, gerinim ve yer değiştirme miktarlarını araştırmışlardır [13]. Tam ve arkadaşları (2023) gri ilişkisel analize dayalı Taguchi yöntemini kullanarak 29/34 koltuklu otobüsün şasi yapısını optimize etmişlerdir. Bu çalışmada, şasi dayanımı sağlanırken araç ağırlığını azaltmak amacıyla tasarım değişkenleri olarak tavandaki çapraz profillerin sayısına ve kalınlığında revizyon gerçekleştirmişlerdir [14]. Ko ve arkadaşları (2009), kompozit malzemeden üretilmiş parçaların kullanıldığı bir otobüsün darbe dayanımını sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Hazırladıkları modeli ECE R66 regülasyonuna uygun olarak devrilme analizine ve önden çarpma analizine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlarda sürücü ve yolcuların hayatta kalmalarını sağlayacak alanların, devrilmeye karşı korunduğunu tespit etmişlerdir [15].

Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme ve ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda gövde karkasında bazı tasarımsal değişikliklere gidilmiş ve araç ağırlığı azaltılmıştır. Yeni tasarım tekrar aynı sınır şartlarında analiz edilerek doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

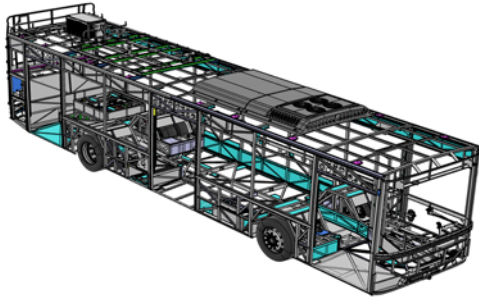
Yapılan literatür araştırmalarından da görüleceği üzere benzer toplu taşıma araçları sonlu elemanlar modeli kullanılarak farklı yönlerden incelenmektedirler. Ancak sonlu elemanlar modelinin sadece gövde üzerinde oluşturulduğu modellerde gövde karkasını etkileyen kuvvetlerde farklılık yaşanmakta ve sonuçların doğruluğu azalmaktadır. Tüm bunlarla birlikte literatürde yapılan çalışmaların genel olarak ticari bir tasarımı içermemesi sebebi ile yerleşim planı ve teknik özelliklerin detaylı incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmanın en önemli özgülüğü, modelleme

aşamasında aksların gövde ile tüm bağlantı parçalarının modellenerek yolcu yerleşim planı gibi önemli etkilerin gerçek hayattaki ile birebir olarak uygulanması sayesinde daha doğru sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada örme şasi tipine sahip, M3 sınıfı, 92 yolcu kapasiteli ve çift aksa sahip 12 metre elektrikli bir otobüs gövdesinin yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Otobüs gövdesine ait üç boyutlu katı model Catia V6 programı kullanılarak tasarlanmıştır. Gövde karkasının genişliği 2500 mm uzunluğu 12000 mm ve yüksekliği 3000 mm'dir. 1185 adet profil ve 187 farklı sac levha kullanılan gövde karkasının toplam ağırlığı 3130 kg olarak ölçülmüştür (Şekil 1).

Çalışmadaki sonuçların gerçeğe en yakın olarak elde edilmesi açısından gövde karkasının yanı sıra, aracın aksları ve camları da modellenmiştir. Araç üzerinde altı tanesi tavan bölgesinde, dört tanesi arka bölgede olmak üzere 10 adet batarya kullanılmaktadır. Bataryalar da dahil olmak üzere araca etki edecek tüm kütleler, kendi ağırlık merkezlerinden ilgili bölgelere tanımlanmıştır. Tüm kütleler dahil edildikten sonra aracın tam kapasitede ağırlığının 19500 kg olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. 12 Metre otobüs gövde karkası modeli

Standart üretim yöntemlerine uygun olarak tasarlanan otobüs gövdesinde, profiller için otomotiv sektöründe sıkça kullanılan ve korozyon gibi istenmeyen durumlara karşı galvaniz kaplamalı S350GD+Z malzemesi kullanılmıştır. Otobüsün sac kaplamaları ve diğer tüm destek sacları için ise St37

yapı çeliği tercih edilmiştir. Otobüs gövde karkasında kullanılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

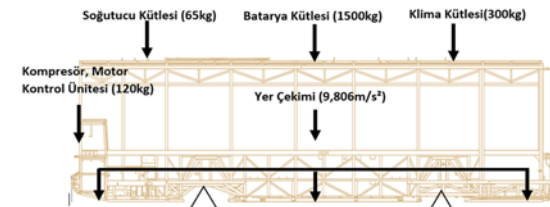
Çizelge 1. Gövde karkasında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Profiller (S350GD+Z)	Sac levha (St37)
Elastisite modülü (GPa)	210Gpa	210Gpa
Poisson oranı	0.3	0.3
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	7.8
Akma sınırı (MPa)	350	250

Yolcu kütlesi ve araç üzerinde etkili olan diğer tüm kütleler aracın ilgili bölümlerine noktasal kütle şeklinde kendi ağırlık merkezlerinden tanımlanmıştır. Analiz senaryolarında uygulanacak sınır şartları otobüsün gerçekteki tüm çalışma koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda gövde ile etkileşimi olan tüm komponentler modellenmiş, körük ve süspansiyon kuvvetleri olarak aracın ilgili bölümlerine yaylar tanımlanmış süspansiyonları temsilen tepki kuvvetleri belirlenmiştir. Mesnet noktaları aracın tekerlek bölgeleri olup, diğer aks parçaları ise uygun serbestlik dereceleri tanımlanmıştır. Aracın işletme koşullarındaki çalışmasının gözlemlenmesi için aracın hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo seçilmiş ve yapısal analizler bu senaryolara göre yapılmıştır.

### 2.1. 1G Senaryosu

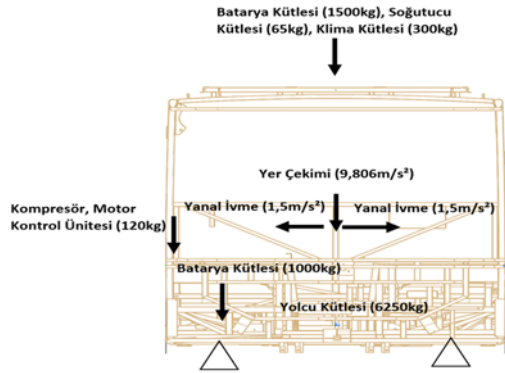
Birinci senaryo aracın en çok maruz kaldığı durumlardan biri olup bu senaryoda taşıt gövdesi tam yüklü durumda iken yerçekimi ivmesinin meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Aracın 1G senaryosuna ait yükleme durumu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 1G yükleme durumu şematik görüntüsü

## 2.2. Yanal İvmelenme Senaryosu

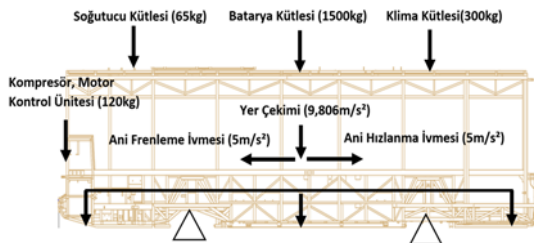
Araç sağ veya sol yönde virajlı yollarda seyahat halinde iken virajın yarıçapına bağlı olarak aracın ağırlık merkezinde viraja ters yönde bir ivmelenme oluşacaktır. Bahsi geçen bu ivmelenme yanal eksenin iki yönü için  $1,5 \text{ m/s}^2$  olarak kabul edilip gövde karkası üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu durum incelenirken 1G durumunda Şekil 2'de görülen tüm sınır şartları aynı kalmış ek olarak sadece ağırlık merkezinden sağ ve sol yönde  $1,5 \text{ m/s}^2$  ivme eklenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Yanal ivmelenme senaryosu şematik görüntüsü

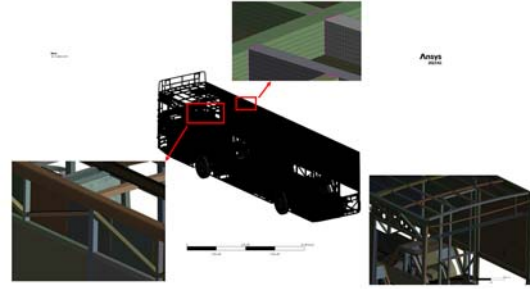
## 2.3. Ani Hızlanma ve Frenleme Senaryosu

Tüm taşıtlarda hızlanma ve frenleme anları, diğer senaryolarda olduğu gibi ağırlık merkezlerinden ivmelenerek gerçekleşmektedir. Araç hızlandığı anda gövdenin ağırlık merkezinden gidiş yönünün tersine bir ivme oluşacaktır. Bu ivme,  $5 \text{ m/s}^2$  olarak kabul edilmiş olup bunlara ek olarak 1G senaryosunda uygulanan tüm sınır şartları uygulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Ani hızlanma ve frenleme senaryosu şematik görüntüsü

Sonlu elemanlar ağında gövde yapısını içeren yüzey elemanlar için quadrilateral elemanlar katı elemanlar için ise hexahedron elemanlar kullanılmıştır. Tüm gövde konstrüksiyonunu oluşturan profiller için 10 mm boyutlandırma yapılmıştır. Çarpık elemanların oluşmaması için model üzerinde yer alan radyus gibi detaylar temizlenmiştir. Tüm bunlara ek olarak gövde yapısını oluşturan tüm profiller gerilme geçişlerinin daha hassas gözlenmesi adına Space Claim ortamında aynı düğüm noktasını paylaşıp olacak şekilde modellenmiş ve mesh geçişlerinde aynı düğüm noktasının kullanılması sağlanmıştır. Kurulan sonlu elemanlar modeli 4006856 düğüm noktası ve 3794000 eleman sayısından oluşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Gövde karkası sonlu elemanlar modeli

Ortalama eleman kalite değeri 0.9491 olarak elde edilmiştir (Şekil 6).

Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Element Q...	Default (5, e-002)
Smoothing	High
Mesh Metric	Element Quality
Min	5,2628e-004
Max	1,
Average	0,9491
Standard Deviat...	0,1055
+ Inflation	
+ Batch Connections	
+ Advanced	
- Statistics	
Nodes	4006856
Elements	3794000

Şekil 6. Ağ yapısına ait eleman kalite bilgileri

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

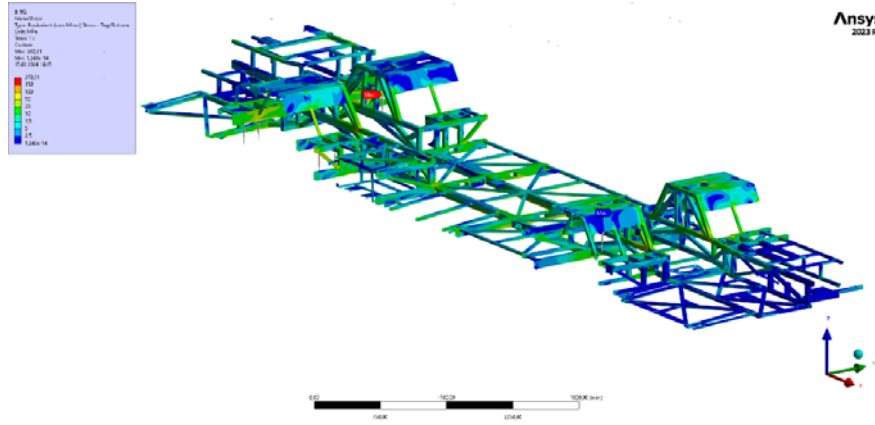
### 3.1. 1G Senaryosu Analiz Sonuçları

Belirtilen sınır şartları için, 1G senaryosuna ait analiz sonuçları incelendiğinde, aracın en kritik

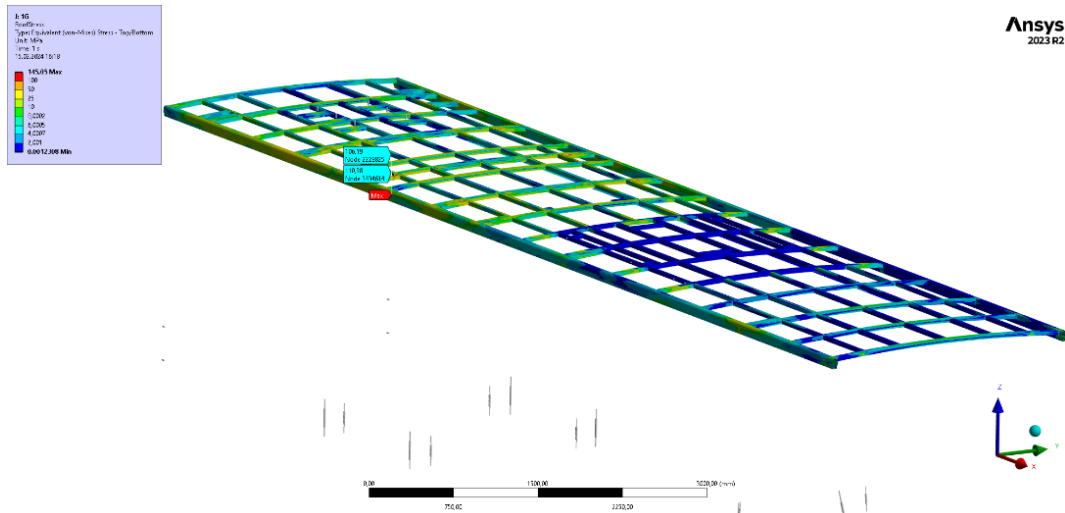
bölgeleri yükleme koşullarına bağlı olarak şasi ve tavan bölgelerinde tespit edilmiştir. Gövdenin sonlu elemanlar modeli kurulurken karkasta yer alan tüm profillerin radyuslu kısımlarının temizlenmesi sonlu elemanlar hesaplarında bazı çentik etkilerinin oluşmasına sebep olmuştur. Çentik etkilerinin yarattığı “singularity” sebebiyle maksimum gerilmeler düğüm noktalarının ikincisinden okunmuş ve çentik etkileri ihmal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde şasi bölgesinde maksimum 177 MPa gerilme görülmüştür. Kullanılan malzemenin S350 yapı çeliği olduğu bilindiğinden en kritik sayılabilecek noktada bile

şasi bölgesi yaklaşık olarak 2 kat emniyetlidir (Şekil 7).

Bir diğer kritik nokta olan tavan bölgesindeki gerilme dağılımı incelendiğinde ise, bataryanın taşıyıcı takozlarının bulunduğu braketlerde yaklaşık olarak 130 MPa gerilme değeri okunmuştur. Asıl tehlike yaratabilecek kesme gerilmelerinin meydana geldiği bağlantı kenarlarında ise maksimum 60 MPa bir gerilme değeri görülmektedir. Bu bulgulardan yola çıkarak tavan bölgesinin gerilme yığılmalarının en çok görüldüğü noktalarda dahi 2,5 kat emniyetli olduğu söylenebilir (Şekil 8).



Şekil 7. 1G yükleme koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



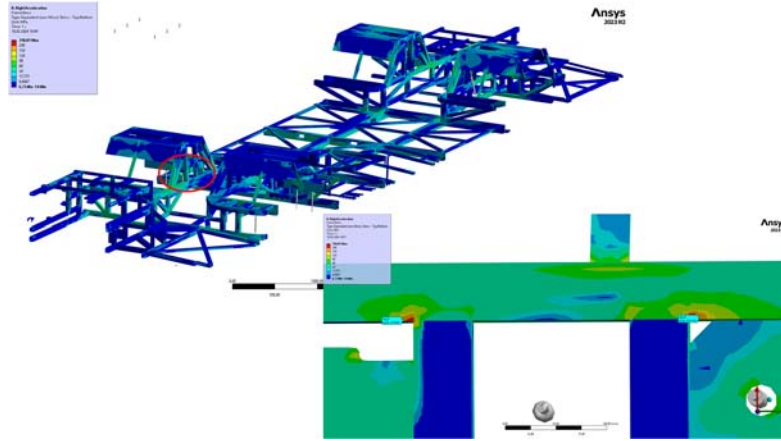
Şekil 8. 1G yükleme koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Sağ ve sol duvar profilleri ise 1G senaryosunda ekseriyetle basma ve burkulma gerilmelerine maruz kalacaklardır. Bu tür karkas yapılarında basma ve burkulma gerilmeleri büyük tehlikeler yaratmadığı görülmektedir.

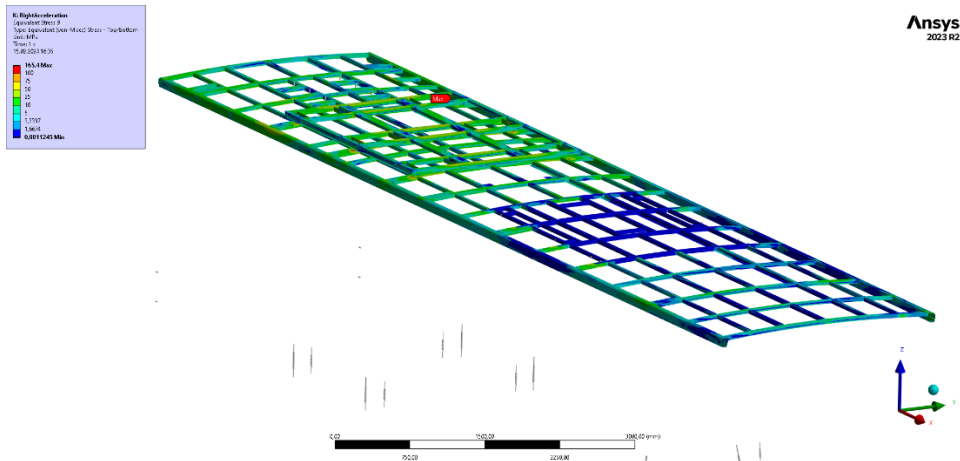
### 3.2. Yanal İvmelenmesi Senaryosu Analiz Sonuçları

Bu senaryo kapsamında tüm sınır şartları aynı bırakılıp ağırlık merkezine yer çekimine ek yanal bir ivme ekleyip yapısal analiz tekrarlanmıştır. Gerilme yığılmaları 1G senaryosunda olduğu gibi aks ve tavan bölgelerinde gözlemlenmiş fakat büyük bir artış meydana gelmediği görülmüştür.

Otobüs viraj anında iken özellikle şasi üzerinde yanal ivmenin meydana getirdiği eğilme ve burulma momentlerine bağlı olarak, aks mesnet bölgelerinde gerilme artışları gözlemlenmiştir. Aracın tam yüklü durumunda ağırlık merkezinin arka aks bölgesine yakın olması sebebi ile 1G Senaryosunda olduğu gibi en büyük gerilme miktarı arka aksın mesnetlendiği kirişte 205 MPa olarak okunmaktadır. Okunan bu değer kullanılan yapı çeliğine göre emniyetli bölgede kaldığından herhangi bir tehlike teşkil etmemektedir. Tespit edilen bu gerilme değerleri yapı üzerinde süreklilik yaratmayıp ağ yapısının anlık olarak bir miktar bozulması ve keskin köşelerin çentik etkisi yaratması sonucu meydana gelmiştir (Şekil 9).



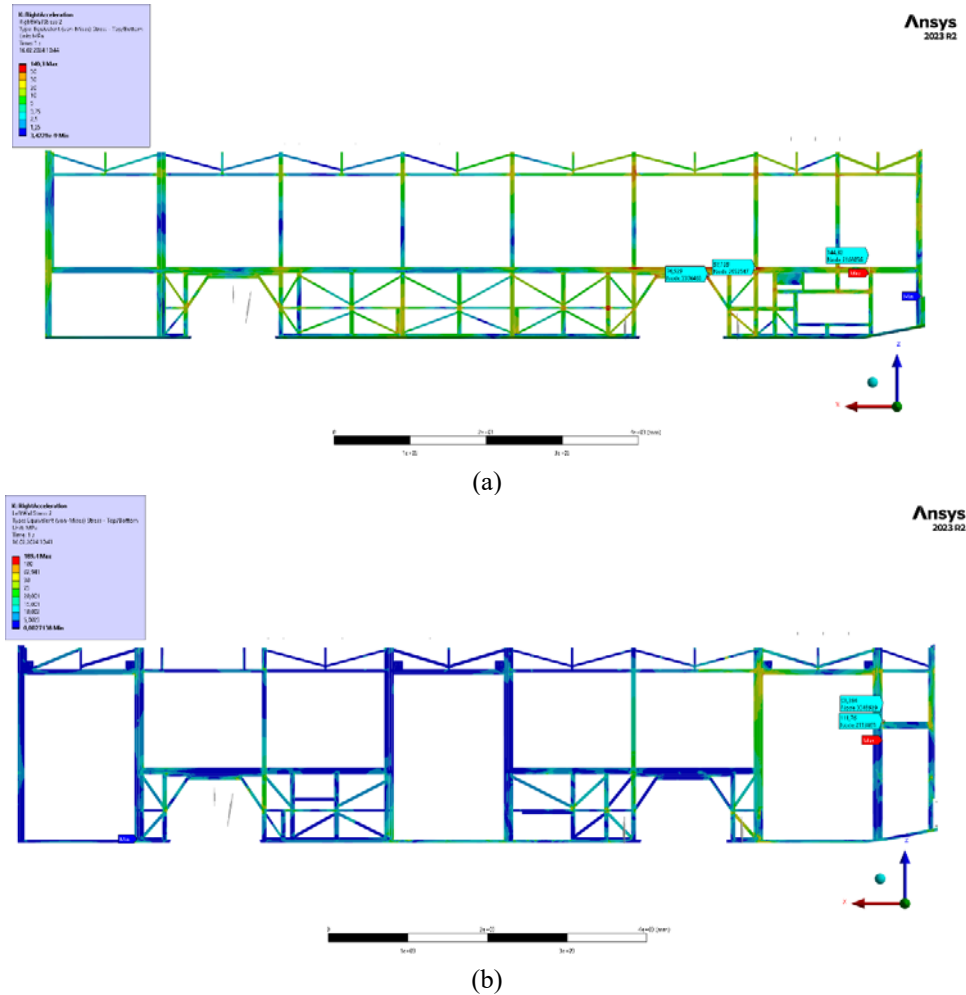
Şekil 9. Yanal ivmelenme koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



Şekil 10. Yanal ivmelenme koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Tavan bölgesi üzerinde yaklaşık olarak 1800 kg statik yük bulunmaktadır. Viraj anında batarya bağlantı noktalarının araca paralel eksen etrafında dönmeye çalışmasından dolayı zorlanmalar meydana gelmiş ve tavan batarya bağlantı bölgelerinde 165 MPa civarlarında gerilme değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen gerilme değerinin ekseriyetle standart yer çekiminden kaynaklandığı ve basma yönünde olduğu görülmüştür. Bölgede kullanılan malzeme açısından değerlendirildiğinde ise yaklaşık 2,2 kat emniyetli olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple tavan profilleri ve sacları üzerinde yapısal açıdan herhangi bir tehlike olmadığı görülmüştür (Şekil 10).

Viraj senaryosunda dikkat edilen diğer bölgelerden birisi de sağ ve sol duvar bölgeleridir. Bu bölgeler ağırlıklı olarak basma gerilmelerine maruz kalmakta ve bu bölgelerde yapının nispeten sık profillerden oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple yapı rijit davranmakta ve yüksek gerilmelerin oluşmasını engellemektedir. Sağ ve sol duvar bölgelerinde, ana taşıyıcı olarak uzun kirişler bulunmaktadır. Bu kirişler bahsedildiği gibi basma ve burkulma gerilmelerine maruz kaldığından kesitlerine bağlı olarak atalet momentleri önem arz etmektedir. Yapısal analiz çıktılarından görüldüğü üzere ana kirişler, sistemi viraj senaryosunda dahi rijit ve emniyetli bölgede tutmaktadır (Şekil 11).



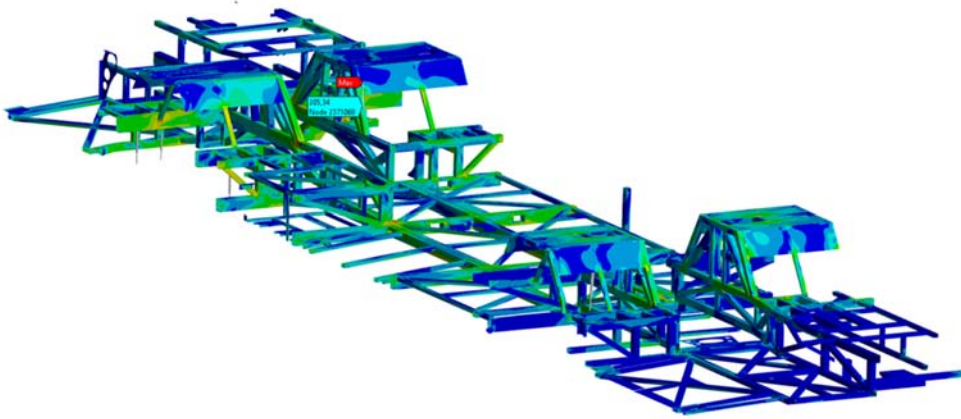
Şekil 11. Yanal ivmelenme koşulunda a) sağ duvar, b) sol duvar yapısal analiz sonuçları



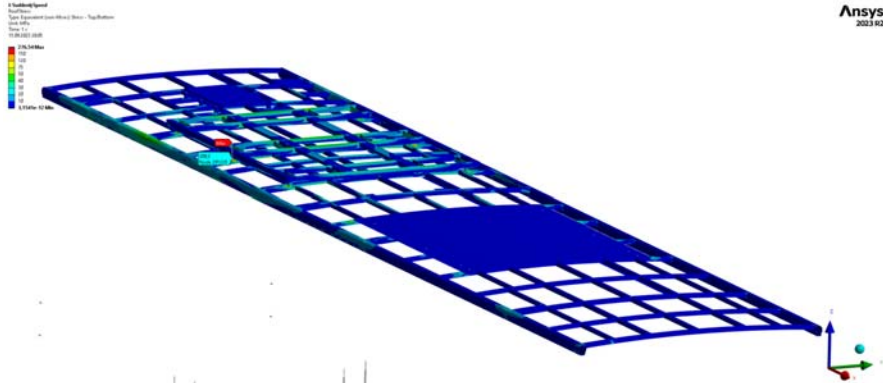
### 3.3. Ani Hızlanma ve Frenleme Senaryoları Analiz Sonuçları

Ani hızlanma durumu için Şekil 4'te açıklanan sınır şartları uygulanmıştır. Sonuçlar incelenip diğer senaryolar ile kıyaslandığında büyük farklılıklara rastlanmamıştır. Maksimum gerilme değeri arka aks mesnet bölgesinde görülmüştür. Ani hızlanma senaryosu için şasi ve tavan bölgeleri detaylıca

incelenmiş, yapılan inceleme sonucunda şasinin paralel eksenine göre ivmelenmesi, aracın yanal ekseninde dönmeye çalışarak burulma momentine maruz kalmasına sebep verdiği görülmüştür. Fakat araç paralel eksende yanal eksene kıyasla daha rijit bir yapı oluşturduğundan dolayı gerilme değerlerinde herhangi bir artışa rastlanmamıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Ani hızlanma koşulunda şasi bölgesi yapısal analiz sonuçları



Şekil 13. Ani hızlanma koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Tavan bölgesi incelendiğinde maksimum gerilme değerlerinin diğer analiz senaryoları ile benzer bölgelerde olduğu ve bir miktar artış gösterdiği görülmüştür (Şekil 13). Bahsi geçen bu artışın nedeni aracın paralel eksen yönünde ivmesinin artması sonucunda batarya bağlantı takozlarında meydana gelen kayma gerilmesidir. Bu bölgedeki batarya bağlantı takozlarından alınan noktasal

ölçümlerde 208 MPa değerinde bir gerilme okunmuş ve bu değer 350 MPa olan akma sınırından düşük olduğu için bu bölge emniyetli kabul edilmiştir.

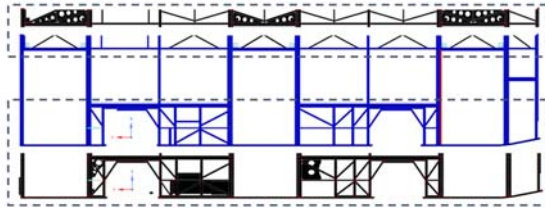
Ani frenleme durumu da araç üzerinde ivmelenme bakımından ani hızlanma durumu ile aynı etkiyi oluşturduğu görülmektedir. İncelenen tüm

senaryolarda, şasi bölgesinin mesnet noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelmiş ancak bu değerler maksimum olarak 200-250 MPa arasında yer almıştır. Ani frenleme durumunda maksimum gerilme oluşan bölge değişmemiş fakat bu senaryoda araç öne doğru burulmaya çalıştığından dolayı ön akslarda oluşan gerilme miktarlarında artış meydana gelmiştir.

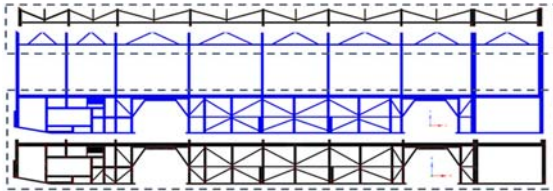
Tavan bölgesinde batarya yükleri simetrik bir biçimde dağıldığından dolayı, bataryanın geldiği taşıyıcı karkasta herhangi bir gerilme değişimine rastlanmamıştır.

### 3.4. Gövde Hafifletme Çalışmaları

Çalışma kapsamında üç farklı senaryo altında gerçekleştirilen yapısal analizler sonucunda gövde karkasında düşük gerilme oluşan bölgelerde tasarım değişiklikleri ile hafifletmenin mümkün olacağı görülmüştür. Yapısal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk olarak sağ ve sol duvar profil yapılarının bazı bölgelerinde düşük gerilme bölgeleri ve sık bir profil yapısına rastlanmıştır. Bu bağlamda bazı tasarımsal değişikliklere gidilmiştir (Şekil 14). Sağ ve sol duvar bölgelerinin yanı sıra bu tür değişiklikler tavan batarya taşıyıcıları ve araç içi sac metal parçalarda da yapılmış olup, iptal edilen ve değiştirilen parçaları gösteren tasarım Şekil 15’de verilmiştir.

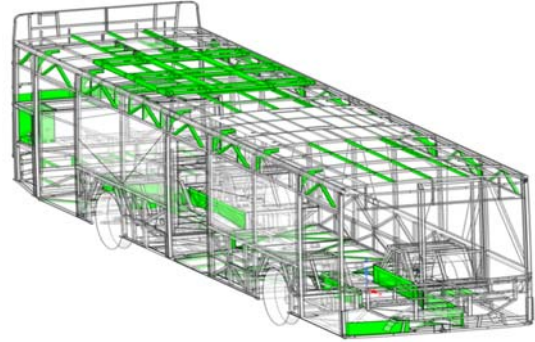


(a)



(b)

Şekil 14. a) Sol duvar profilinin, b) sağ duvar profilinin eski ve yeni hallerinin kıyaslanması



(a)



(b)

Şekil 15. a) Yapısal optimizasyona tabi tutulan bölgeler, b) iptal edilen parçalar

Optimizasyon işlemi gövde üzerinde 289 adet komponent üzerinde uygulanmıştır. Bunlardan 45’i iptal edilirken 244 parça üzerinde yapısal optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemler sonucunda 232 kg kütleli bir azalma meydana gelmiştir. Bu kısımdan sonraki aşamalarda, yeni tasarım için ilk gövde karkasına uygulanan analiz senaryoları aynı sınır şartları ile tekrar edilmiştir.

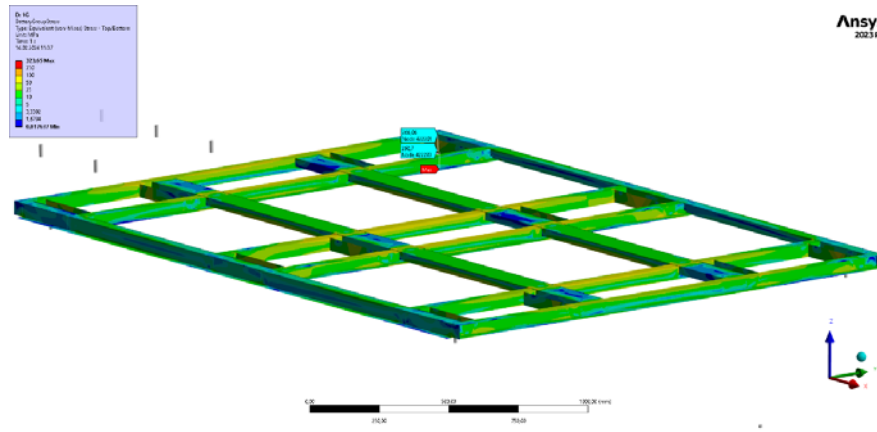
Yeni tasarım gövde karkası üzerinde yapılan yapısal analiz sonuçları incelendiğinde, şasi bölgesinde yapıyı etkileyecek büyüklükte bir optimizasyon işlemi yapılmadığından gözle görülür bir gerilme artışı meydana gelmemiştir. Ancak tavan bölgesi ve özellikle tavanda bulunan batarya karkas bölgesinde birçok komponent optimizasyona uğradığından dolayı, bu bölgedeki gerilme seviyeleri 140 MPa değerlerinden 267 MPa değerlerine kadar yükselmiş fakat bu değer,

kullanılan S350GD+Z yapı çeliğinin akma sınırına uzak olduğundan dolayı 1,3 kat emniyetli olduğu görülmüştür.

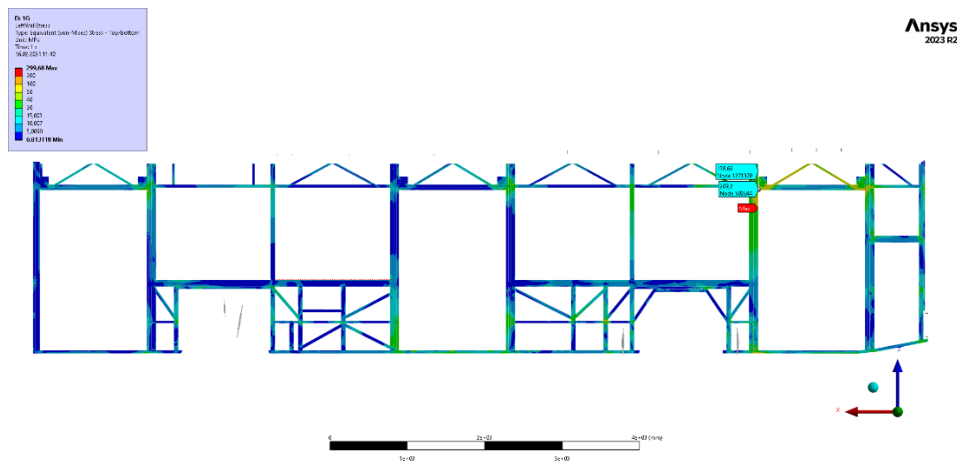
Çalışmaya konu M3 sınıfı yolcu taşıma otobüsü ticari olarak üretilmekte ve sonlu elemanlar analizleri sonrasında çeşitli test aşamalarından geçmekle birlikte sahada aktif çalışan otobüslerin yapısal durumları geri bildirimler ile takip edilmektedir. Metinde bahsi geçen emniyet katsayısının bu durumlar göze alındığında yeterli olduğu görülmektedir. Literatür tarandığında, Kabakçı ve Solmaz (2019) Statik yükleme analizinde otobüs gövdesinin azami yüklü haldeyken meydana gelen deformasyon ve gerilmeleri incelenmiştir. Maksimum gerilme

değeri 1245,7 MPa olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte emniyet katsayıları da sırasıyla alt şasi yapısında 0,285 ve karkas yapıda da 0,369 olarak bulunmuştur. Buradan hareketle bazı optimizasyon ve ağırlık azaltma çalışmaları da yapılabilir şeklinde ifade etmişlerdir [7,16] (Şekil 16). Batarya bölgesinin dışında kalan tavanın diğer bölgelerinde herhangi bir yükleme olmadığından dolayı bir gerilme artışı gözlenmemiştir.

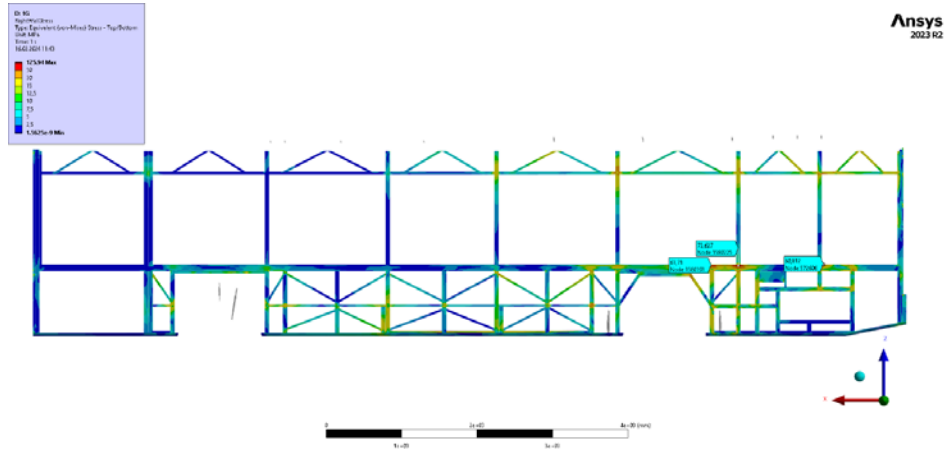
Optimizasyon yapılmış diğer bölümler olan sağ ve sol duvar profillerinde gözle görülür bir gerilme artışı olmuş fakat profil yapısının yeterince rijit seviyede olduğu göz önüne alındığında tehlike yaratacak bir soruna rastlanmamıştır (Şekil 17).



Şekil 16. 1G ivmelenme senaryosu altında yeni tasarımda batarya taşıyıcıları üzerindeki gerilme dağılımı



(a)



(b)

Şekil 17. Ani hızlanma koşulunda tavan bölgesi yapısal analiz sonuçları

Şekil 17’te 1G durumunda sağ ve sol duvar profilleri üzerindeki gerilme dağılımı verilmektedir. Özellikle sol duvar üst profil bölgesinin bataryaları taşıyan bölümlerine bakıldığında, bu bölgelerde profil yapısının tasarımının değişmesinden dolayı kayma ve kesme gerilmelerinin arttığı açıkça görülmektedir. Fakat tüm bu gerilmelerin 60 MPa değerini geçmediği görülmüştür. Arka kapının olduğu bölgedeki sacların kaldırılmasından dolayı yatay taşıyıcı profiller üzerinde bir miktar gerilme artışı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgede kapı yer alması ve bataryaların bir bölümünün de aracın arkasında yer almasından dolayı okunan gerilme değeri ikinci tasarım için 132 MPa değerinden 250 MPa seviyelerine yükselmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yolcu taşımacılığında kullanılan bu tarz taşıtlar için çeşitli yapısal optimizasyon tekniklerinin kullanılarak benzer hafifletme oranlarının elde edildiği gözlenmiştir [8,17].

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada M3 sınıfı bir elektrikli otobüsün çalışma koşullarındaki davranışlarını incelemek için hareket halinde en çok maruz kaldığı üç senaryo olan tam yükte 1G ivmelenme, yanal ivmelenme, ani frenleme ve hızlanma senaryolarında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda otobüsün tam yüklü

durumunda, en çok zorlanma yaşayacağı senaryoda (1G ivmelenme) emniyetli olduğu görülmüştür. Ayrıca yeni tasarım sonucunda ortaya çıkan yapıda da gerilme değerleri, kullanılan malzemenin akma sınırlarını aşmamış ve karkas yapısının statik ve tam yüklü durumda güvenli bölgede olduğu görülmüştür. Yenilenmiş tasarımda yanal ivmelenme sırasında batarya taşıyıcıları üzerindeki maksimum gerilme %10 oranında bir artış göstererek 290 MPa seviyesine ulaşmıştır. Bu bölge taşıyıcı takozların olduğu bölgede olduğundan 1G senaryosunda olduğu gibi tehlike yaratmayacak ve araca ağırlık merkezinden viraj anında ivme uygulandığında rijit bir davranış sergileyecektir. Yeni tasarlanmış sağ ve sol duvar profilleri üzerinde yanal ivmelenmenin yarattığı etki incelendiğinde, eğilme momentinin artışı sebebiyle köşe bağlantı noktalarında çok küçük gerilme artışları meydana gelmiş fakat bu artış yapıyı olumsuz yönde etkilememiştir. Son olarak ani hızlanma ve frenleme senaryoları yeni tasarım için incelendiğinde, değişiklik yapılan bölgelerde ve genel yapıda akma sınırının dışında bir gerilmeye rastlanmamıştır. Ani hızlanma ve frenlemenin ağırlık merkezinde yarattığı  $5\text{m/s}^2$ ’lik ivme değeri özellikle aracın aks ve tavan bölgelerinde yer alan batarya karkasının kaynak noktalarında etkili olmuştur. İlk tasarım ile kıyaslandığında ana yapısal parçaların formundan büyük değişiklikler yapılmadığından gerilme değerlerinde kayda değer bir artış yaşanmamıştır. Yapılan tasarım

değişiklikleri ile M3 sınıfı otobüs gövde karkasında, sol duvarda 19,694 kg, sağ duvarda 17,346 kg, tavan bölgesinde 72,43 kg, şasi ve diğer bölgelerde ise 122,53 kg kazanç sağlanarak toplamda 232 kg'lık bir hafifletme sağlanmıştır. Toplam araç gövdesi göz önüne alındığında yaklaşık %7,41 oranında bir ağırlık düşüşü elde edilmiştir. Yeni tasarım mevcut analiz senaryoları ile doğrulanmıştır.

## 5. KAYNAKLAR

1. European Union, 2022. Directorate-General for Mobility and Transport European Commission, EU transport in Figures-MIAA22001ENN.
2. Tzeiranaki, S.T., Economidou, M., Bertoldi, P., Thiel, C., Fontaras, G., Clementi, E.L., De Los Rios, C.F., 2023. The Impact of Energy Efficiency and Decarbonisation Policies on the European Road Transport Sector. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 170, 103623.
3. Koffler, C., Rohde-Brandenburger, K., 2010. On the Calculation of Fuel Savings Through Lightweight Design in Automotive Life Cycle Assessments. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15, 128-135.
4. Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N., Sendeniz, G., 2014. A Case Study: Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure. Sustainability, 6(7), 4608-4631.
5. Cimprich, A., Sadayappan, K., Young, S.B., 2023. Lightweighting Electric Vehicles: Scoping Review of Life Cycle Assessments. Journal of Cleaner Production, 139692.
6. European Union, 2015. Light Weighting as a Means of Improving Heavy Duty Vehicles' Energy Efficiency and Overall CO2 Emissions, Rep. DG Clim. Action, 1, 199.
7. Arslan, T.A., Solmaz, H. 2018. M3 Kategorisi Bir Otobüs Tasarımı ve Yapısal Analizleri. In Proceedings on International Conference on Technology and Science, Antalya, 343-351.
8. Karamert, S., Demir, A., 2022. Ticari Otobüs Gövde Yapısında Topoloji Optimizasyonu Çalışması. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 34(2), 229-234.
9. Jung, Y., Lim, S., Kim, J., Min, S., 2020. Lightweight Design of Electric Bus Roof Structure Using Multi-Material Topology Optimisation. Structural and Multidisciplinary Optimization, 61, 1273-1285.
10. Kongwat, S., Jongpradist, P., Hasegawa, H., 2020. Lightweight Bus Body Design and Optimization for Rollover Crashworthiness. International Journal of Automotive Technology, 21, 981-991.
11. Raj, A., Ahamed, S., Rajath, H.G., Byregowda, H.V., 2020. Structural Analysis of Bus Body Frame Using Fea for Static and Dynamic Analysis. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 7(8), pp. 2975-2979.
12. Fu, C.L., Bai, Y.C., Lin, C., Wang, W.W., 2019. Design Optimization of a Newly Developed Aluminum-Steel Multi-Material Electric Bus Body Structure. Structural and Multidisciplinary Optimization, 60, 2177-2187.
13. Croccolo, D., De Agostinis, M., Vincenzi, N., 2011. Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis Via FEM: A Methodology Applied to a Case Study. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57(11), 799-809.
14. Tam, N.T., Le, T.P., Huynh, N.T., Nguyen, Q.M., 2023. Optimization of Frame Structure Coach 29/34 Seats in Static Durability State. Engineering Science and Technology, an International Journal, 47, 101523.
15. Ko, H.Y., Shin, K.B., Jeon, K.W., Cho, S.H., 2009. A Study on the Crashworthiness and Rollover Characteristics of Low-Floor Bus Made of Sandwich Composites. Journal of Mechanical Science and Technology, 23, 2686-2693.
16. Kabakçı, H., Solmaz, H., 2019. M3 Kategorisinde Bir Körüklü Otobüs Tasarımı ve Yapısal Analizleri. International Symposium on Automotive Science and Technology, 5-6 September 2019 Ankara, Turkey.
17. Haryanto, I., Raharjo, F., Kurdi, O., Haryadi, G., Santosa, S., Gunawan, L., 2018. Optimization of Bus Body Frame Structure for Weight Minimizing with Constraint of Natural

*M3 Sınıfı Bir Elektrikli Otobüsün Farklı Senaryolar Altında Sonlu Elemanlar Analizleri ile Hafifletilmesi*

Frequency Using Adaptive Single-Objective Method. International Journal of Sustainable Transportation Technology, 1, 9-14.

## Kısa Pistli Uçak Gemilerinden Operasyonel Olarak İHA Kaldırmak İçin Maliyet Etkin Bir Yaklaşım

Mustafa MURAT<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-5404-870X

Fahrettin ÖZTÜRK<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0001-9517-7957

<sup>1</sup>Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 28.08.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: MURAT, M., ÖZTÜRK, F., (2024). Kısa Pistli Uçak Gemilerinden Operasyonel Olarak İHA Kaldırmak İçin Maliyet Etkin Bir Yaklaşım. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 23-30.

### Öz

Havacılık endüstrisi ve savunma sanayiinde uçak gemilerinin operasyonel olarak kullanılması oldukça kritik bir konudur. Günümüzde ise uçak gemilerinin operasyonel konsepti İnsansız Hava Araçları (İHA) ile beraber kurgulanmaktadır. İHA'ların uçak gemilerinin minimum maliyet ile kaldırılması askeri anlamda birçok faydayı beraberinde getirecektir. Değişken hücum açılı kanada sahip olarak tasarlanan bir insansız hava aracı, kısa mesafeli uçak gemisi pistlerinden rahatlıkla kalkabilmesi için uygun bir tasarım öngörülmüş ve bu bağlamda uygun bir matematik model ile hesaplamalar doğrulanmıştır. Yapılan hesaplamalarda ülkemizin en büyük uçak gemisi Türkiye Cumhuriyeti Gemisi (TCG) Anadolu'dan toplam ağırlığı 1425 kg'ı geçmeyen İHA rahatlıkla kalkış-iniş yapabilir sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Değişken hücum açılı kanat; Kısa mesafeden kalkış; Uçak gemisinden İHA kalkışı

### A Cost-Effective Approach to Operationally Removing UAVs from Short-Runway Aircraft Carriers

#### Abstract

The operational use of aircraft carriers in the aviation industry and defense industry is a critical issue. Today, the operational concept of aircraft carriers is designed together with Unmanned Aerial Vehicles (UAV). The removal of aircraft carriers of UAVs with minimum cost will bring many benefits in military terms. An UAV designed with a variable angle of attack wing was designed to be able to easily take off from short-range aircraft carrier runways, and in this context, a suitable mathematical model was used to validate the calculations. In the calculations, it was concluded that the UAV, whose total weight does not exceed 1425 kg, can easily take off and land from Republic of Türkiye Ship (TCG) Anadolu, the largest aircraft carrier of our country.

**Keywords:** Variable incidence wing; Take-off from short runway; UAV Take-off from aircraft carrier

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Fahrettin ÖZTÜRK, [fahrettin71@gmail.com](mailto:fahrettin71@gmail.com)

## 1. GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA)'ın sivil, askeri ve istihbarat alanında kullanımı son yıllarda hızla artmaktadır [1]. Özellikle askeri olarak, savunma, saldırı, istihbarat gibi önemli alanlarda etkinliği artan insansız hava araçlarının önemi her geçen yıl daha da iyi anlaşılırken, ülkelerin bu teknolojiye yaptığı yatırımlar da katlanarak artmaktadır.

İHA'lar köklü konvansiyonel savaş metotlarında paradigma değişimlerine yol açmış, savaş stratejilerini değiştirmiş, artık savaşların İHA faktörlerine göre yeniden kurgulandığı bir döneme girilmiştir [2]. Özellikle ülkemizde üretilen İHA'lar gündem olmuştur. Bunun en önemli örneklerini dünyaya Türk İHA'larının Karabağ, Libya, Suriye, Irak gibi birçok bölgede defalarca kanıtlamış, tüm dünya ülkemizin bu alandaki teknolojik gücünü ve ürün kalitesini kabullenmiştir. Bunun neticesinde hava araçlarının ihracatı sürekli artarak devam etmekte, dünyada İHA denince akla Türk insansız hava araçları gelmeye başlamıştır [3].

Bu platformların gelişmesiyle birlikte birbirinden farklı modeller ortaya çıkmıştır, örneğin seyir füzeleri artık bu platformlara entegre edilirken kimi zaman baz istasyonu olarak bile kullanılabilir hale gelen modelleri ve hatta denizaltı avlayan modelleri dahi savunma sanayinin hizmetine sunulmuştur. Bu gibi amaçların dışında sosyal faaliyetlerde de sık sık kullanılan bu teknoloji yangın, deprem ve herhangi bir doğal afet durumunda da kendilerine geniş kullanım alanları bulmaktadır [4]. Medya sektöründe de hemen hemen her yerde kullanılmaya başlamıştır. İHA'ların kullanım alanları arttıkça ve varyasyonları da zaman içinde geliştikçe bu sistemlerin deniz platformlarına taşınması ve operasyonel olarak savaş gemilerinde kullanılması gelişmiş orduların bir isteği haline gelmeye başlamıştır. Bu isteğin en önemli sebebi şüphesiz savaş gemilerinin harp sahasındaki öneminden kaynaklanmaktadır. Zira bir filo hava aracını deniz ötesi ihtiyaç olan bir bölgeye intikal ettirip ana karadan uzakta savaş ve ikmal faaliyetlerini başarıyla sürdürebilmek ancak savaş gemileriyle mümkün olmaktadır. İnsan faktörü olmayan İHA'ların bu savaş gemileriyle başarılı bir şekilde entegrasyonu ve operasyonel olarak

kullanılmasının ise önümüzdeki dönemlerde savaş stratejisinde derin izler bırakacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda kısa pistli savaş gemilerinden operasyonel olarak İHA kaldırıp indirmek günümüzün en önemli mühendislik konuları arasında yer almaktadır. Örneğin güvertesinde katapult ile çekme veya kanca ile durdurma sistemi olmayan, pisti de kısa olan (202 m) TCG Anadolu gemisinden İHA kaldırıp indirmek ciddi bir mühendislik konusu olup yeni maliyet etkin yaklaşımlara açık bir alandır. Bu bağlamda değişken hücum açılı kanat tasarımı ile kısa pistli gemilerden kalkış ve iniş operasyonel olarak mümkün olacaktır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Değişken hücum açılı kanat tasarımı hava aracına birçok alanda esneklik kazandırmaktadır. Bunların başında üretilen kaldırma kuvvetinin istenilen durumlarda artırılıp azaltılması ve CL/Cdmax açısının her uçuş koşulunda rahatlıkla yakalanması olarak özetlenebilir. (CL: Kaldırma veya taşıma katsayısı, Cd: Sürüklenme katsayısı). Değişken hücum açılı kanat tasarımı fikri 1950'lere kadar uzanmaktadır. Değişken hücum açılı kanat için ilk patent 1912 yılında George Boginoff tarafından alınmıştır [5]. İlk uçuşunu 25 Mart 1955 tarihinde gerçekleştiren F-8 jeti, değişken hücum açılı kanatları ile Amerikan Deniz Kuvvetlerinde kullanılmıştır. Toplamda 1219 adet üretilen bu hava aracı 1900'lerin ortasında kendine operasyonel olarak kullanım alanı bulmuştur [6]. Hava araçlarının deniz platformlarında kullanımı genel olarak ciddi bir konu iken bu durum 1950'lerde daha büyük bir sorun olarak karşımıza çıkmıştır. Özellikle hava aracının uçak gemisine yaklaşması esnasında uçağın hızının yavaşlaması, uçağın hücum açısının artmasına sebebiyet veriyordu. Uçağın hücum açısının artması ise pilotların pisti görmesini zorlaştırıyor, ciddi kullanım zorluklarına yol açıyordu. Bu sorunu çözmek amacıyla F-8 tasarımcıları değişken hücum açılı kanat ile uçağın hücum açısını artırmadan sadece kanadın hücum açısını artırarak uçağın gemiye daha kontrol edilebilir ve güvenli olarak yaklaşmasını amaçlayarak Şekil 1'de görülen F-8'i tasarladılar. Bu tasarım değişikliği sadece uçağın daha düşük hızlarda güvenle gemiye yaklaşıp inmesini



sağlamadı aynı zamanda gemiden daha kısa mesafede kalkmasına da katkıda bulundu.



Şekil 1. Değişken hücum açılı kanada sahip F-8 jeti

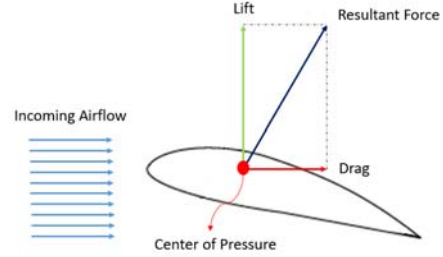
### 3. MALZEME VE METOT

Bu bölümde yapılan hesaplamalarda kullanılan metot açıklanacaktır. Hava araçlarının uçuş hesaplamaları çok karmaşık olduğu için matematik modelleme yöntemleri bu hesaplamaları gerçekleştirirken kullanılan en temel yöntemdir. Bu bağlamda matematik model Matlab SIMULINK ile kurulmuştur. Matematik modele eklenmesi gereken parametreler ise CFD analizleri ile uçuş mekaniği verilerini el hesaplaması temeline göre sonuçlandıran XFLR5 programı ile hesaplanmış ve matematik modele eklenmiştir. Kurulan matematik model ile kalkış süresi kalkış mesafesi, kalkış hızı vb. tüm parametreler hesaplanarak grafiklendirilmiştir.

### 4. KISA MESAFEDEN KALKIŞ ANALİZİ

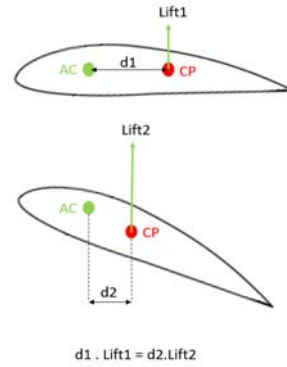
Bu bölümde değişken kanat açılı mekanizmanın hava aracının kalkış mesafesine olan etkisi ve buna bağlı olan diğer parametrelerin incelenmesi söz konusudur. Bu parametreler, basınç merkezi, aerodinamik merkez, nötr nokta ve stabilite olarak sıralanabilir.

Şekil 2’de gösterildiği üzere basınç merkezi kanatta oluşan kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin bileşke olarak etkidiği hayali noktaya verilen addır.



Şekil 2. Basınç merkezi

Hücum açısı Şekil 3’de gösterildiği üzere yaklaşan hava veya ilgili hava akımı ile hava aracı üzerindeki bir veter çizgisinin arasındaki açıdır.



Şekil 3. Aerodinamik merkez

Uçakların ürettiği kaldırma kuvvetinin çok büyük bir kısmı kanatlardan elde edilmektedir. Her ne kadar gövde ve diğer komponentler de kaldırma kuvveti üretse de asıl etki kanattan gelmektedir. Üretilen kaldırma kuvveti:

$$L = (0.5) * (\rho) * (v)^2 * S * C_L [7]$$

$\rho$  = Hava yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

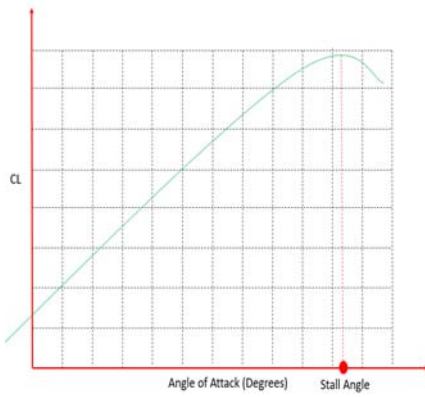
$v$  = Hava aracı hızı (m/s)

$S$  = Kanat izdüşümü (m<sup>2</sup>)

$C_L$  = Kaldırma katsayısı

formülüyle hesaplanmaktadır. Bu formülde uçağın hızının ve havanın yoğunluğunun sabit olduğunu varsayarsak kaldırma kuvvetinin artması için  $C_L$  katsayısının artmasının gerektiği görülmektedir.  $C_L$

katsayısının artması ise doğrudan kanadın hücum açısına bağlıdır [8]. Bu durumda, kanadın hücum açısını ihtiyaç halinde artırabileceğimiz bir tasarım yapmak kısa pistten kalkış imkânını İHA'lar için mümkün kılacaktır. Kanadın gövdeye oturma açısının yüksek CL ihtiyacı olduğu durumlarda artırılması ve gerekli ihtiyacın ortadan kalkması durumunda da (CL/Cd)max açısına getirilmesi hem kısa pistten iniş kalkışı sağlayacak hem de maksimum havada kalışı sağlayacaktır [9].



Şekil 4. CL-alfa grafiği

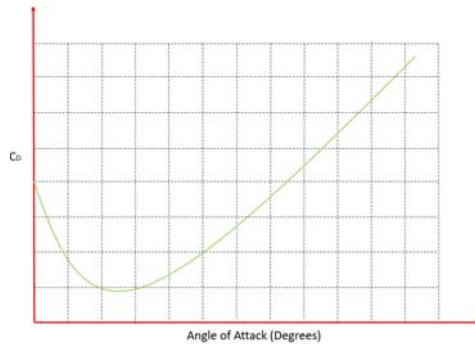
Cd-alfa grafiği (Şekil 5) bir diğer önemli parametredir. Toplam üretilen sürüklenme kuvveti aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$D = 0.5 * \rho * v^2 * S * Cd \quad [10]$$

D: Sürüklenme kuvveti (Newton)

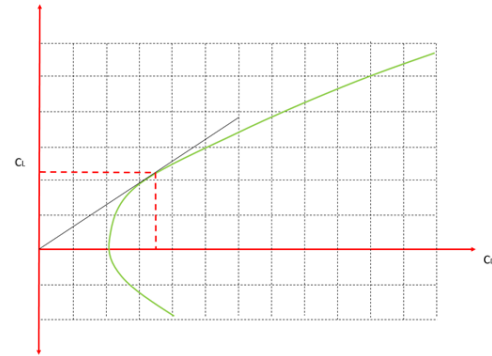
Cd: Sürüklenme katsayısı

Örnek bir Cd-alpha grafiği Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Cd-alfa grafiği

İHA tasarımı esnasında dikkat edilen en önemli parametrelerden bir tanesi de CL-Cd grafiğidir. Zira CL-Cd değerinin maksimum olduğu açı aynı zamanda maksimum havada kalış için gerekli açı olduğu için bir diğer önemli parametre olarak değerlendirilmektedir. (CL/Cd)max değeri Şekil-6'da sembolize edildiği üzere CL-Cd grafiğinde orijinde başlayıp grafiğe teğet çizilen bir doğrunun açısı olarak hesaplanmaktadır.



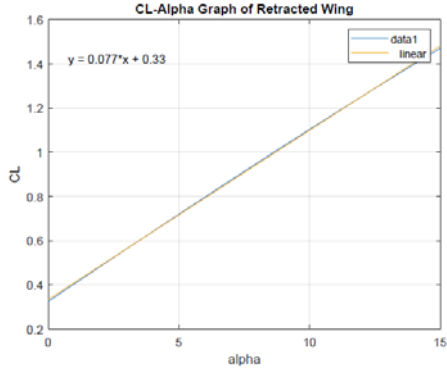
Şekil 6. CL-Cd grafiği

Bu çalışmada kalkış mesafesinin hesaplanması Matlab Simulink programında kurulan matematik modelle gerçekleştirilmiştir. Kullanılan matematik modelde kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, motor itkisi, yer sürtünmesi v.b. parametreler kullanılmıştır. Kurulan matematik modelde kullanılan aerodinamik katsayılar XFLR5 programı kullanılarak hesaplanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Kanat modeli aerodinamik veriler

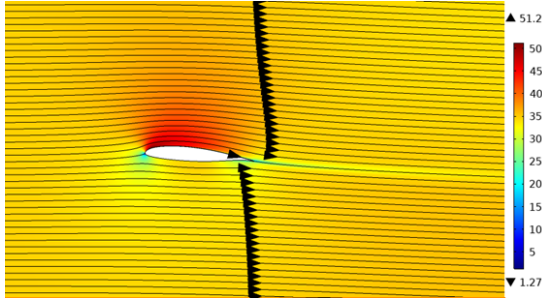
alpha	CL	CD	Cm	XCP
0	0,325062	0,010693	-0,17838	0,9602
1	0,364823	0,011787	-0,18803	0,9016
2	0,404533	0,012932	-0,19765	0,8546
3	0,483775	0,015821	-0,21684	0,7838
4	0,562736	0,019623	-0,2359	0,7331
5	0,641363	0,024105	-0,25483	0,695
6	0,719607	0,029173	-0,2736	0,6654
7	0,797416	0,034853	-0,29219	0,6418
8	0,874741	0,04091	-0,31057	0,6225
9	0,951533	0,04755	-0,32872	0,6066
10	1,027	0,054655	-0,34663	0,5931
11	1,103	0,062443	-0,36427	0,5818
12	1,178	0,070784	-0,38163	0,572
13	1,252	0,079416	-0,39867	0,5635
14	1,325	0,088469	-0,41539	0,5562
15	1,398	0,097917	-0,43175	0,5498

Yukarıda verilen CL-alfa değerleri aşağıdaki tabloda gösterilen 1. dereceden yaklaşım ile lineerleştirilip matematik modele eklenmiş ve Şekil 7’de gösterilmiştir.

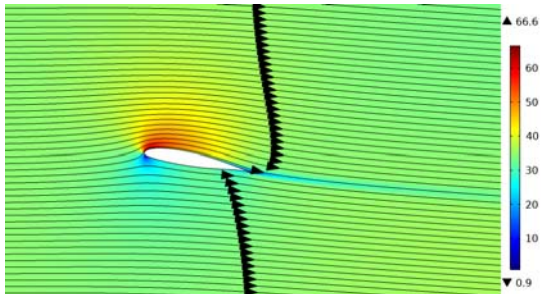


Şekil 7. CL-alfa grafiği

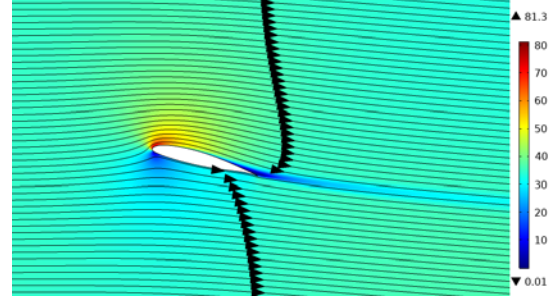
Kanat için sadece XFLR5 programı kullanılmamış olup CFD analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu kompleks CFD analizleri neticesinde de kanadın CL-alfa grafiği XFLR5 programı ile benzer çıkmıştır. 4,10 ve 14 derece açıları için hız ve basınç gradyenleri Şekil 8 ve Şekil 13 arasında sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.



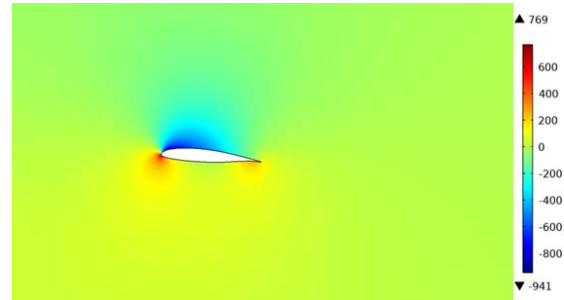
Şekil 8. 4 derece hücum açısı için hız gradyeni



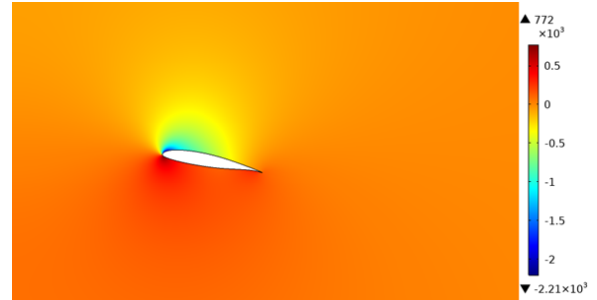
Şekil 9. 10 derece hücum açısı için hız gradyeni



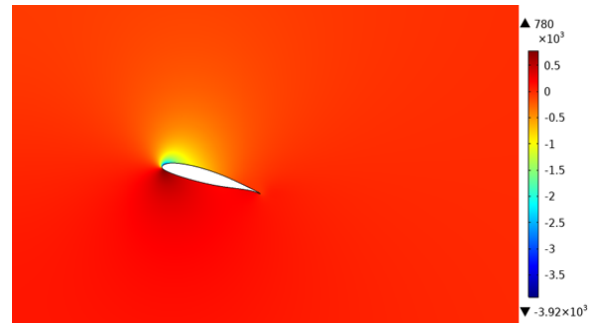
Şekil 10. 14 derece hücum açısı için hız gradyeni



Şekil 11. 4 derece hücum açısı için basınç gradyeni



Şekil 12. 10 derece hücum açısı için basınç gradyeni



Şekil 13. 14 derece hücum açısı için basınç gradyeni

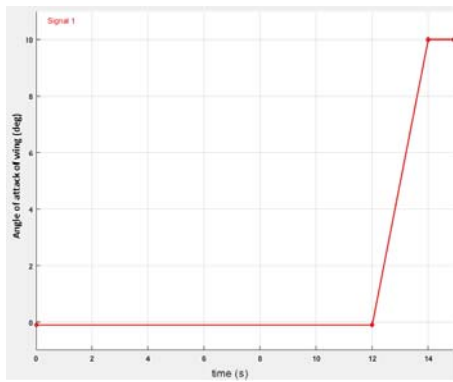
CFD sonuçları ile elde edilen CL-alfa grafiği ile XFLR5 programı ile elde edilen CL-alfa grafiği benzerlik göstermektedir.

Hava aracının toplam ağırlığı 1425 kg olarak alınmıştır. Bu ağırlığın 225 kg'ı yakıt ağırlığı olarak toplam itki ise 3000 Newton olarak kabul edilmiştir. Pist olarak ise Şekil 14'te gösterilen TCG Anadolu amfibi hücum gemisinin eğimli atlama rampası (ski-jump) pisti matematik modele eklenmiştir. TCG Anadolu'nun toplam pist uzunluğu 202 metredir.



Şekil 14. TCG Anadolu

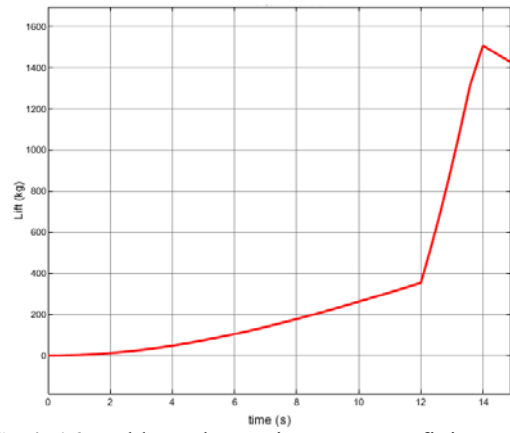
Kanadın hücum açısı ve kanadın kaldırma kuvveti arttıkça sürüklenme kuvveti de artmaktadır. Sürüklenme kuvvetinin artması ise hava aracının hızını azalttığı için kanadın hücum açısı 12. saniyede kalkışa kısa bir süre kala 10 dereceye çıkartılmıştır. Kanadın hücum açısının zamana bağlı değişimi Şekil 15'de gösterilmiştir.



Şekil 15. Kanadın hücum açısı – zaman grafiği

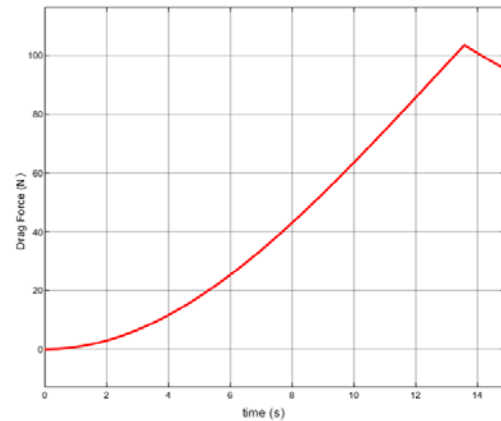
Kaldırma kuvveti Şekil 16'da gösterildiği üzere 12. saniyeye kadar kademeli olarak artmıştır. 12.

saniyeden sonra ise kaldırma kuvvetinde ani bir artış gerçekleştirmiştir. Bu artışın sebebi kanadın hücum açısının bu saniyeden sonra artmasıdır. 14. saniyeden sonra oluşan kaldırma kuvvetinin azalmasının sebebi ski-jump bölgesinin eğimi dolayısıyla. Kalkış bittiğinde ise 1435 kg kaldırma kuvveti üretilmektedir, bu da hava aracının toplam kalkış ağırlığı kadar olduğu için kalkışın başarılı olduğu söylenebilir.



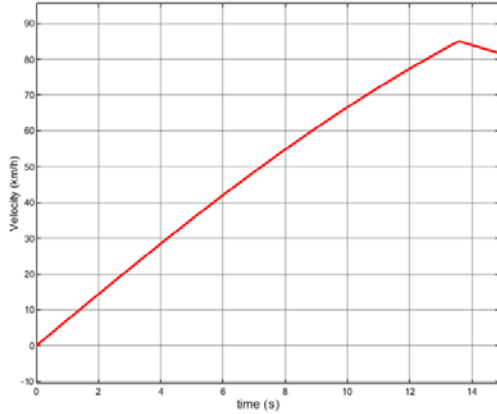
Şekil 16. Kaldırma kuvveti – zaman grafiği

Sürüklenme kuvveti ise bu süre zarfında eksponansiyel olarak ski-jump bölgesine kadar artmıştır. Sski-jump bölgesinde hız azaldığı için sürüklenme kuvveti bu bölgede azalmıştır. Sürüklenme kuvveti zaman grafiği Şekil 17'de gösterilmiştir.



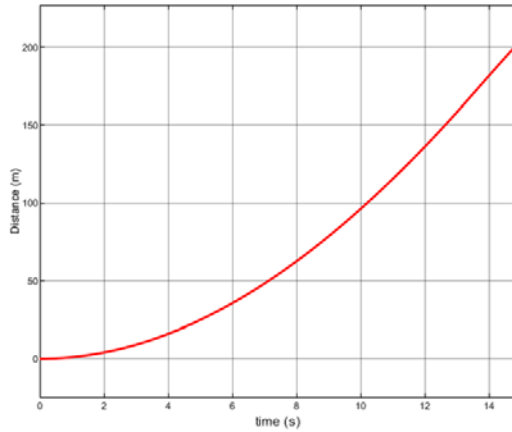
Şekil 17. Sürüklenme kuvveti – zaman grafiği

Hava aracının hız – zaman grafiği de neredeyse lineer olarak ski-jump bölgesine kadar artmış bu bölgeden sonra hız-zaman grafiği negatif eğime dönmüştür. Hava aracının hız-zaman grafiği Şekil 18’de gösterilmektedir.



Şekil 18. Hız-zaman grafiği

Hava aracının konum-zaman grafiğinin değişimi ise eksponansiyel olarak gerçekleşmiş, hava aracı 202 metrelik pisti 14,9 saniyede tamamlamıştır. Modellemede elde edilen konum-zaman grafiği Şekil 19’da ifade edilmiştir.



Şekil 19. Konum-zaman grafiği

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler ve hesaplamalar pist uzunluğu 202 metre olan ski-jump TCG Anadolu gemisinden toplam ağırlığı

1425 kg’ı geçmeyen kanat hücum açısı değiştirilebilir bir mekanizmaya sahip bir insansız hava aracının rahatlıkla katapult sistemi kullanmadan kalkabildiğini göstermektedir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Villi, O., Yakar, M., 2022. İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri. Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 4(2), 73-100.
2. Karakuş, C., Katman, F., 2019. Male Sınıfı İnsansız Hava Aracı (İHA) Teknolojisi ve Konvansiyonel (Geleneksel) Savaşta Yeri. Akademik Tarih ve Düşünce Dergisi, 6(2), 882-897.
3. Ateş, E., 2021. Türkiye’nin İnsansız Hava Aracı (İHA) İhracat Rekabet Gücünün Analizi. Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 3(1), 7-16.
4. Erdelj, M., Natalizio, E., 2016. UAV-Assisted Disaster Management: Applications and Open Issues. 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Kauai, 1-5.
5. Boginoff, G., 1912. Aéroplane "Monoplan" Pouvant se Transformer en Biplan Dans la Chute, <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/001485019/publication/FR44.4010A?q=pn%3DFR444010>, Erişim tarihi: 08.07.2023.
6. United States Naval Institute Proceedings, 1965.
7. NASA, 2021. The lift equation, <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/lifteq.html#:~:text=The%20lift%20equation%20states%20that,times%20the%20wing%20area%20A.&text=For%20given%20air%20conditions%2C%20shape,Ci%20to%20determine%20the%20lift>. Erişim tarihi: 10.07.2023, Cleveland.
8. Soontornpasatch, T., 2018. Computational Study of Low and High Subsonic Speed Aerodynamic Characteristics of the Modified Airfoil Profile. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 405.
9. NASA, 2021. Lift to drag ratio-glenn research center, <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-to-drag-ratio/> Erişim tarihi 10.07.2023, Cleveland.

10. Houghton, E.L., Carpenter, P.W., 2003.  
Aerodynamics for Engineering Students,  
Burlington, 28.

## **Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Mersin-Gaziantep Yüksek Hızlı Tren Hattı için İstasyon Yeri Seçimi**

**Olca KALAN\***<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5828-7743

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 24.11.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

*Atıf şekli/ How to cite: KALAN, O., (2024). Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Mersin-Gaziantep Yüksek Hızlı Tren Hattı için İstasyon Yeri Seçimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 31-45.*

### **Öz**

Ülkemizde demiryolu sistem ağının genişletilmesi fikri ile çok fazla yüksek hızlı tren projesi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda şuan yapım aşamasında olan ve üzerinde çalışılan birçok demiryolu projesi bulunmaktadır. Yüksek hızlı trenler (YHT), yolcu kapasitesinin yüksek olması, kısa süre yolculuk yapabileme imkânı vermesi, emniyetli, konforlu ve verimli bir ulaşım türü olması nedeniyle son dönemde dünyanın birçok ülkesinde ve ülkemizde trafik yükünü azaltmanın ana araçlarından biri haline gelmiştir. Bu çerçevede yüksek hızlı tren hatlarından biri olan Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattının yapımına devam edilmektedir. Yapılan bu çalışmada, hattın kullanılabilirliğini arttırmak için bu proje kapsamında Adana-Mersin arasında yeni inşa edilecek 2 yeni demiryolu için istasyonların önem sırasının belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak en uygun istasyon seçimi için değerlendirme ölçütleri tanımlanmış, daha sonra Mersin-Adana arasındaki tren hattında belirlenen istasyonlar alternatif istasyon yerleri olarak ölçütlere göre değerlendirilmiştir. İstasyon konumlarını değerlendirmek için Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılmış ve belirlenen lokasyonların önem sırası ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Çok kriterli karar verme, AHP, Yüksek hızlı tren, İstasyon yer seçimi

### **Station Location Selection for Mersin-Gaziantep High Speed Train Line with Analytical Hierarchy Process**

#### **Abstract**

Many high-speed train projects have been carried out in our country with the idea of expanding the railway system network. At the same time, there are many railway projects that are currently under construction and are being worked on. High-speed trains (YHT) have recently become one of the main means of reducing the traffic load in many countries of the world and in our country, due to its high passenger capacity, providing the opportunity to travel for a short time, and being a safe, comfortable and efficient mode of transportation. In this context, the Mersin-Gaziantep high-speed train line, which is one of the high-speed train lines, continues to be built. In this study, it was aimed to determine the order of importance of the stations for the 2 new railways to be built between Adana and Mersin within the scope of this project in order to increase the usability of the line. First, evaluation criteria were defined for the selection of the most suitable station, then the stations determined on the train line between Mersin and Adana were evaluated

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Olca KALAN, [okalan@cu.edu.tr](mailto:okalan@cu.edu.tr)

according to the criteria as alternative station locations. Analytical Hierarchy Process (AHP) was used to evaluate station locations and the order of importance of the determined locations was revealed.

**Keywords:** Multi-criteria decision making, AHP, High speed train, Station location selection

## 1. GİRİŞ

Artan araç kullanımına bağlı olarak genişleyen şehir yapısının getirdiği durum ve koşullar sonucu, yolculuk uzaklıkları ve süreleri artmıştır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, seyahat seçenekleri içerisinde hesaplı ve emniyetli olmasından dolayı demir yollarının kullanımı daha çok tercih edilmektedir. Ülkemizde ise 2003 yılından sonra tekrar oluşum süreci ile birlikte demir yolu kullanımında seri bir ilerleme gözlemlenmiştir. Oluşan ilerlemeler yönünde hat kapasitesindeki çoğalma ile beraber yükselen sürat ve maksimum taşıma miktarı ülkemizde de demir yollarının gelecekteki devirlerde hedeflenen düzeylere çıkacağını göstermektedir [1].

Ülkemizdeki kentler arasındaki yolculuk süresinin düşürülmesi, seri, konforlu ve emniyetli bir seyahat olanağı oluşturulması ve bununla beraber seyahat ederken demiryolu kullanımının çoğaltılması hedeflenmektedir. TCDD (Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları) son zamanlarda ayırdığı bütçelerle daha dinamik ve hızlı yolcu taşınmasını gerçekleştirmek için büyük yol kat etmiştir [2]. Bu gelişimin en mühim kısmını ise YHT projeleri sağlamaktadır. Türkiye'nin her yerine demiryollarını kullanarak ulaşma amacı üzerine çok fazla sayıda proje gerçekleştirilmiştir ve günümüzde de yapımı süre gelen güzergahlar ve projelendirilmekte olan yeni yol planları ile YHT'ler aracılığıyla demiryollarına önem verilmektedir. Fakat bu tür ulaşım yollarının yapım bütçesi fazla olduğundan finans, sürdürülebilirlik ve sosyal yarar gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

YHT'ler, 1960-1965 yılları arasında Japonya'da ortaya çıkmıştır. 10 milyon nüfuslu Tokyo gibi metropol kentlerin nüfus popülasyonunu çevredeki yerleşim bölgelerine dağıtma fikrinden hareketle Tokyo - Osaka şehirleri arasında YHT hatları yapılmıştır.

Günümüzde demiryollarının tercih edilir olmasının sebepleri arasında dünyada karayolu lojistiğinin sıradanlaşması ve insanların yolculuk yapmak istemesi gelmektedir. Bunun yanı sıra karayollarında görülen yoğun trafik ve kazalar gibi sorunların çözümünde ilk başta tren yolu lojistiği gelmeye başlamıştır. Demiryolları farklı ulaştırma seçeneklerine göre daha az maliyetli, daha çok miktarda yük ve yolcu ulaştırma imkanına sahiptir. Bu yüzden YHT hatlarının çoğaltılması ve YHT ile yolcu taşımacılığının artırılması önem kazanmıştır.

Ülkemizde şehirlerarası yolculuk zamanının kısa süreli olması, hızlı, ucuz, konforlu ve emniyetli yolculuk sağlaması ile YHT'lerin çoğaltılması hedeflenmektedir. Demiryolu çalışmalarında birçok proje gerçekleştirilmekte ve şuan yapımı süren hatlar ve projelendirme aşamasında olan yeni hatlar bulunmakta olup YHT taşımacılığına önem verilmektedir. Demiryolu hattının yapılacağı yer ve güzergâh, yatırımın verimliliği açısından önemlidir. Ayrıca güzergâh üzerinde düşünülen istasyon noktaları da en az hattın güzergâh planlanması kadar önemlidir. İstasyonlara ulaşılabilirliğin sağlanması konusunda istasyon noktalarının seçiminde, bölgenin popülasyonu, genişleme potansiyeli ve mevcut ulaşım uyum gibi etkenler dikkate alınmalıdır. Ayrıca YHT'ler için hız sınırları, yavaşlama ve hızlanma ivmeleri göz önünde bulundurularak en uygun istasyon aralıklarının saptanması ile uzaklıkların kısalması sağlanacaktır. Dolayısıyla istasyon yeri seçimi gibi birçok karar sürecine, çok fazla etmenin etki etmesi, analitik süreçleri ve matematiksel prototipleri gerektirmektedir [3].

Gerçekleştirilen bu çalışmada, öncelikle toplu ulaşımında güzergâh seçimi için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş, daha sonra Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattı için istasyon yerleri çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olan AHP ile değerlendirilerek en uygun istasyon yeri belirlenmeye çalışılmıştır.



Literatürde raylı sistemler, YHT hatları, toplu taşıma araçları ve metro hatları için güzergah seçiminde AHP'yi kullanan çalışmalar incelenmiştir.

Brunner ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptıkları çalışmada Hawai'nin Honolulu kentinde, Salt Lake ve Havaalanı arasında sabit raylı sistem için uygun güzergah belirlemişlerdir. Belirledikleri güzergahın seçiminde teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel kriterleri dikkate almışlardır. Karar vermede AHP ve GIS (Geographic Information Systems) yöntemlerini kullanmışlardır [4]. 2013 yılında yine Dedemen'in yaptığı çalışmada, güç transfer hatları için güzergah seçimi için GIS (Geographical Information Systems)'e dayalı AHP yöntemi kullanılmıştır. Güzergah seçimi için dört alternatif hattın uygun olanı belirlenmiştir [5].

Soltani ve arkadaşları İran'da yer alan Şiraz şehrinde otobüs güzergahı seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Toplam 71 adet bulunan güzergahtan 6 tanesini belirleyip bu güzergahlar arasından en uygun alternatifi 16 adet kriter üzerinden değerlendirmişlerdir [6]. Yıldırım ve Yomralıoğlu 2013 yılında doğalgaz iletim hattı için güzergah seçiminde GIS ile bütünleştirilmiş AHP yöntemini kullanmışlardır. Öncelikle çevresel, ekonomik ve sosyolojik faktörler ortaya konmuş daha sonra alternatif güzergahlar bu faktörler üzerinden değerlendirilmiştir [7].

Alkubaisi'nin 2014 yılında yaptığı çalışmada, Irak'ın Al-Ramadi şehrinde tramvay güzergahı seçimi yapılmıştır. 6 adet alternatifin değerlendirilmesinde yine GIS'e dayalı AHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin uygulanmasında dikkate aldığı kriterler; ulaşılabilirlik, güvenlik, çevre, ekonomik ve nüfus yoğunluğudur [8]. Kays 2014 yılında Avustralya'nın doğu kesimindeki YHT hattı için optimum güzergahı belirlemede karışık tamsayı optimizasyon modelini kullanmıştır. Değerlendirmede maliyet tasarrufunu maksimize etmeye çalışmıştır [9]. Yine aynı yılda yapılan Nosal ve Solecka'nın yaptıkları çalışmada, kentsel toplu taşıma için güzergah seçimi yapılmıştır. Çalışmada AHP yöntemini sosyal,

teknik, ekonomik ve çevresel kriterler dikkate alarak kullanmışlardır [10].

Ahmed ve Asmael 2015 yılında Irak'ın Bağdat şehri için metro güzergahı seçiminde GIS'e dayalı AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında çevresel, mühendislik, ekonomik toplam 9 kriteri güzergahların değerlendirmesinde dikkate almışlardır [11]. Hamurcu ve Eren raylı sistem güzergahı seçimi için AHP yöntemini kullanmıştır. Ankara'da kurulması planlanan monoray sistemi için öncelikle 15 adet kriter belirlemişler daha sonra bu kriterler üzerinden en uygun güzergah seçimini yapmışlardır [12]. 2015 yılında Saat ve Serrano, YHT hattı için optimum güzergahın belirlenmesi amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Malezya'da yer alan Kuala Lumpur ve Singapur şehirlerindeki YHT hatları için güzergah seçiminde ELECTRE yöntemini kullanmışlardır [13]. Keser ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptıkları çalışmada Eskişehir'in demiryolu hattı güzergah seçimi için AHP yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde hattın uzunluğu, seyahat süresi, güvenlik ve yakıt tüketimi kriterlerini baz almışlardır [14].

Kırlangıçoğlu yine aynı yılda yaptığı çalışmada, İstanbul raylı taşıma sistemi için güzergah seçimi yapmıştır. Çalışmasında fiziki ve beşeri faktörleri dikkate alan GIS'e dayalı bir model geliştirmiştir [15]. Yine GIS'e dayalı güzergah tespiti yapan diğer bir çalışma EL-Hallaq ve El-Yazory'nin 2017 yılında yaptıkları çalışmadır. Filistin'in Gazze şehrindeki metro hattı için güzergah seçimi yapan bir model önermişlerdir. Dikkate aldıkları ölçütler nüfus yoğunluğu, karayolu ağı, trafik, park alanları ve arazi kullanımınıdır [16]. Eren ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada, Ankara-Sivas YHT hattı için güzergah seçiminde 4 alternatif arasından seçim yapılmıştır. 10 adet seçim kriteri baz alınarak en uygun alternatif AHP yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [3]. Hamurcu ve Eren'in aynı yılda yaptıkları bir diğer çalışmada İstanbul'daki raylı sistemler için güzergah seçimi yapılmıştır. Çalışmalarında AHP ve ANP yöntemlerini Hedef programlama ile birleştirerek hibrit bir şekilde kullanmışlardır [17].

Taş ve arkadaşları yine aynı yılda monoray hattı için en uygun hat seçimini AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada çift yön bindirme, tek yön bindirme ve tek yön asma tipleri arasından 6 kritere göre seçim yapılmıştır [18]. 2018 yılında Zhou ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada Kore’de üç farklı toplu taşıma tipleri arasından üç tip şehir türü için seçim yapılması amacıyla AHP yöntemi kullanılmıştır [19]. Süt ve Arkadaşlarının 2018’de yaptıkları çalışmada, Ankara-Sivas YHT hattı için AHP yöntemi ile 5 adet ana kriter ve 3 adet alt kriter değerlendirilmiş ve önem seviyeleri saptanmıştır [20].

2019 yılında Hamurcu ve Eren yaptıkları çalışmada Ankara’da yeni bir monoray sistemi için rota seçimi yapmışlardır. Karar vermede ANP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlar ve 8 rota 15 kriter açısından değerlendirilmiş ve rotaların önem sıraları ortaya konmuştur [21]. Sarımehtem ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları çalışmada ise, Kırıkkale YHT istasyonu için 3 adet ana kriter ve 10 adet alt kriter üzerinden ANP ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilme yapılmış ve en uygun güzergah belirlenmiştir [22].

Literatür çalışmasına bakıldığında AHP yönteminin en ideal alternatifin seçiminde sıkça kullanıldığı tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattı projesi kapsamında yeni inşa edilecek demiryolu hatları için Adana-Mersin arasındaki yer alan istasyon bölgelerinin önem sırası belirlenmiştir. Görüşü alınan uzmanlarla belirlenen kriterlerle AHP yöntemi kullanılarak değerlendirme yapılmış ve alternatif istasyonların önem sırası ortaya konmuştur.

## **2. MATERYAL VE METOT**

Ulaşımın planlanmasında önemli basamaklardan biri de istasyon lokasyonlarının belirlenmesi sürecidir. İyi planlanmış bir istasyon konumu, yolcular tarafından tercih edilmeli, operasyonel gereksinimleri karşılamalı ve çevreye uygun

olmalıdır. Hızlı, emniyetli ve konforlu olan YHT’ler, her geçen gün artmakta ve seyahati kolaylaştırmaktadır. Dünyadaki birçok ülkedeki şehir bu araçlarla birbirine bağlanmıştır. Şehir ulaşımının planlaması, bu planların uygulanması ve değerlendirilmesi süreci ana hatlarıyla belirlenmekte ve belirli faktörler üzerinden birçok çalışma yürütülmektedir. Özellikle istasyon lokasyonlarının doğru bir şekilde belirlenmesi planlama aşamasında büyük önem arz etmektedir.

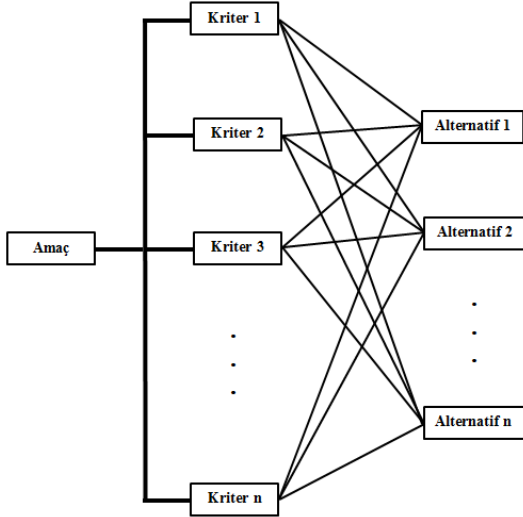
Bu kapsamda yapılan bu çalışmada Mersin-Gaziantep YHT hattı için istasyon yerlerinin seçiminde çok sıklıkla tercih edilen karar verme yöntemi olan AHP yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle yapılan literatür araştırması ve uzman görüşleri dikkate alınarak AHP yönteminin uygulanması için uygun kriterler belirlenmiş daha sonra en iyi alternatif seçimi bu yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

### **2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi**

Karar verme sürecinde çok sıklıkla kullanılan AHP tekniği, 1977 yılında Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen ÇKKV tekniğidir [23].

Karar problemlerinde en uygun kararın verilmesini sağlayan bu teknikte hiyerarşik yapı kullanarak ve analitik inceleme yaparak problemde belirlenen kriterlerin önem sıralaması yapılmaktadır. Bu hiyerarşik yapıda en üstte amaç, orta kısımda kriterler en altta ise alternatifler yer almaktadır [24]. AHP tekniğinin bu hiyerarşik yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir.

AHP’ nin hiyerarşik yapısında öncelikle çözülecek problemin tanımı yapılmakta ve bu probleme uygun amaç net bir şekilde belirlenmektedir. Ardından konuda uzman kişilerin sahip olduğu bilgi düzeyi ve deneyimleriyle probleme ait dikkate alınması gereken kriterler belirlenmektedir. Kriterler belirlendikten sonra problemde belirlenen amaca uygun olarak değerlendirilmesi gereken alternatifler ortaya konur.



Şekil 1. AHP Yönteminde hiyerarşik yapı

Hiyerarşik yapı belirlenirken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri belirlenen kriterlerin problemin çözümünde problemi iyi bir şekilde yansıtmaları ve problemi tüm yönleriyle ele alarak ortaya koymaslarıdır.

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra alternatiflerin değerlendirilmesi süreci gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte kriterler ve alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmaktadır. Bu matrislerde sayısal ölçeklendirme yapılırken, değerlendirmede yer alan uzman kişilerin görüşleri büyük önem arz etmektedir. Kişilerin kriterleri ortaya koyarken ve ölçeklendirme yaparken tarafsız bir yaklaşım sergilemeleri gerekmektedir [25]. Matrisler oluşturulması aşamasını karar vericilerin kişisel değerlendirmesinin test edilmesi aşaması yani tutarlılık oranlarının hesaplanması aşaması takip eder. Tutarlılık oranları hesaplandıktan sonra hiyerarşik yapıda belirlenen alternatiflerin değerlendirilmesi aşamasına geçilir ve değerlendirme sürecinde kriterlerin önem sırası belirlenerek amaca uygun en iyi alternatif seçilir.

Özet olarak AHP Şekil 2’de gösterilen adımları içermektedir [25].

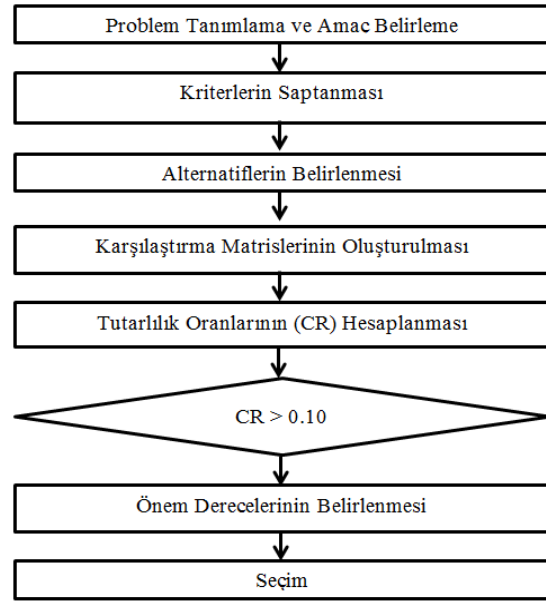
**Problem Tanımlama ve Amaç Belirleme Aşamasında;** öncelikle problem açık ve net bir

şekilde ifade edilmekte ve ardından tanımlanan probleme ait amaç ortaya konmaktadır.

**Kriterlerin Saptanması Aşamasında;** uzman görüşleri doğrultusunda probleme ait tüm kriterler ortaya konmaktadır.

**Alternatiflerin Belirlenmesi Aşamasında;** probleme ait kriterlerle değerlendirilecek tüm alternatifler belirlenmektedir.

**Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması Aşamasında;** probleme ait tüm kriterlerin birbirlerine göre ne kadar önemli olduğu sayısal olarak ifade edilir. Bu matrislerde Saaty tarafından oluşturulan Çizelge 1’deki puan skalası kullanılmaktadır [23].



Şekil 2. AHP Adımları

Çizelge 1. Karşılaştırma matrislerinde kullanılan puan skalası

Önem derecesi	Tanım
1	Eşit önem
3	Birinin diğerine göre zayıf önemi
5	Güçlü önem
7	Çok güçlü önem
9	Mutlak önem
2-4-6-8	Ara Değerler

Matrisler oluşturulurken uzmanların görüşleri alınarak her bir kriterin diğer kriterlere göre önem değeri belirtilir ve bu matris A matrisi olarak isimlendirilir. A matrisinin her bir elemanı  $a_{ij}$ , i. kriter veya alternatifin j. kriter ya da alternatife göre önem değerini belirtmektedir. Eşitlik 1’ de A matrisinin gösterimi yer almaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matrisi  $n \times n$  boyutunda bir kare matristir ve köşegen elemanları 1 dir. Yapılan ikili kıyaslamalar sonucunda;

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Örnek olarak, j. kriter veya alternatifin i. kriter veya alternatife göre önem derecesi 3 ise, i. kriter veya alternatifin j. kriter veya alternatife göre değeri 1/3 tür.

Kriterlerin birbirlerine göre önem değerlerinden oluşan matriste her bir kriterin bütün matris içerisindeki önem değerleri hesaplanmaktadır. A matrisindeki her bir eleman o sütundaki kriter değerlerinin toplamına bölünerek yeni değerler elde edilir. Oluşturulan bu matris C matrisi olarak isimlendirilmektedir. C matrisinin her bir elemanı  $c_{ij}$  ler Eşitlik 2’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

C matrisi, normalize edilmiş A matrisidir. Daha sonra bu matriste her bir satır ortalaması alınarak öncelik vektör değerleri ( $W_i$ ) bulunmaktadır. Bu öncelik vektör değerleri her i. kriterin diğer kriterler içerisindeki önem değerini göstermektedir. Öncelik vektörü  $W_i$ ’ler Eşitlik 3’te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

**Tutarlılık Oranlarının Hesaplanması Aşamasında;** Karar vericilerin değerlendirmelerinin tutarlılığının test edilmesi gerekmektedir [26]. Bunun için A matrisinde tutarlılık oranları hesaplanır ve matris % 100 tutarlı ise A matrisinin en büyük özdeğeri kriter sayısı n e eşit olmaktadır ve  $n = \lambda_{max}$  şeklinde gösterilir. Burada  $A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w$  eşitliğinden A matrisinin en büyük özdeğeri Eşitlik 4’teki gibi hesaplanarak bulunur [25].

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j}{w_i} \quad (4)$$

Eğer tutarsızlık fazla ise A matrisindeki en büyük özdeğer, n değerinden o derece uzak demektir. Tutarsızlık test edilirken iki değer hesaplanmaktadır “**Tutarlılık Endeksi**” (CI) ve “**Tutarlılık Oranı**” (CR) [25]. Eşitlik 5’te “**Tutarlılık Endeksi**” nin, Eşitlik 6’da ise “**Tutarlılık Oranı**”nın nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Burada RI rastsal endeks değeri olarak ifade edilir ve Saaty tarafından belirlenen ve n değerine göre değişen bu sabit sayılar Çizelge 2’de gösterilmektedir [27].

**Çizelge 2.** Rastgele endeks değerleri

N değeri	1	2	3	4	5	6
RI değeri	0	0	0,58	0,89	1,12	1,24
N değeri	7	8	9	10	11	12
RI değeri	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

İkili karşılaştırma matrisinin tutarlı olması için CR değerinin 0.10 değerinden küçük olması gerekmektedir. Tutarsızlık olması durumunda karşılaştırmaların tekrar değerlendirilmesi gerekmektedir [28].

**Alternatifler Arasından Seçim Aşamasında;** hesaplanan öncelik değerlerine bakılarak en yüksek öncelik değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Adana-Mersin Arasında Yeni İnşa Edilecek Yüksek Hızlı Tren Hattı için İstasyonların Değerlendirilmesi

Son yıllarda YHT yatırımları oldukça çoğalmıştır fakat hala bu sisteme ihtiyaç duyulan yerler

bulunmaktadır. Bu yerlerde karar verilecek istasyon bölgeleri hattın verimliliği için çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada Mersin-Gaziantep yüksek hızlı tren hattı projesi 286 km'lik yüksek standarda sahip demiryolunun inşaatını kapsamaktadır. Proje güzergahı Mersin ilinden başlayıp, Adana, Toprakkale, Bahçe, Nurdağı'ndan geçmekte ve Gaziantep'te son bulmaktadır. Proje güzergahı Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Mersin-Gaziantep YHT hattı proje güzergahı

Proje kapsamında Mersin-Adana arasında yer alan 78 km'lik mesafede demiryoluna ek olarak iki adet yeni demiryolu inşa edilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada yeni inşa edilecek bu demiryolları için belirlenebilecek alternatif istasyon yerleri ele alınmıştır.

##### 3.1.1. Alternatiflerin Belirlenmesi

Alternatifler, yöneticiler ve uzmanlar aracılığıyla belirlenen 4 adet istasyon bölgeleridir. Bunlar sırasıyla, Taşkent İstasyonu, Tarsus İstasyonu ve Yenice İstasyonu ve Şehitlik İstasyonudur. Bu

istasyonlar ve sembolik ifadeleri Çizelge 3'te gösterilmiştir. Belirlenen istasyonların haritada gösterimi ise Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Mersin-Adana arası alternatif olabilecek istasyon yerleri

Numara	Sembol	İstasyon yeri
1	İS1	Taşkent istasyonu
2	İS2	Tarsus istasyonu
3	İS3	Yenice istasyonu
4	İS4	Şehitlik istasyonu



Şekil 4. Alternatif istasyon yerleri harita görünümü

**Kriterlerin Kararlaştırılması:** Ulaştırma projelerinin değerlendirilmesi çoğunlukla teknik, ekonomik ve lojistik, çevresel faktörler, emniyet, sosyal etki ve arazi koşulları gibi ana ölçütler

altında yapılmaktadır. Değerlendirme ölçütleri literatür taraması ve uzman görüşleri yönünde belirlenmiştir. Kararlaştırılan ölçütler Çizelge 4'te açıklamalarıyla birlikte sunulmuştur.

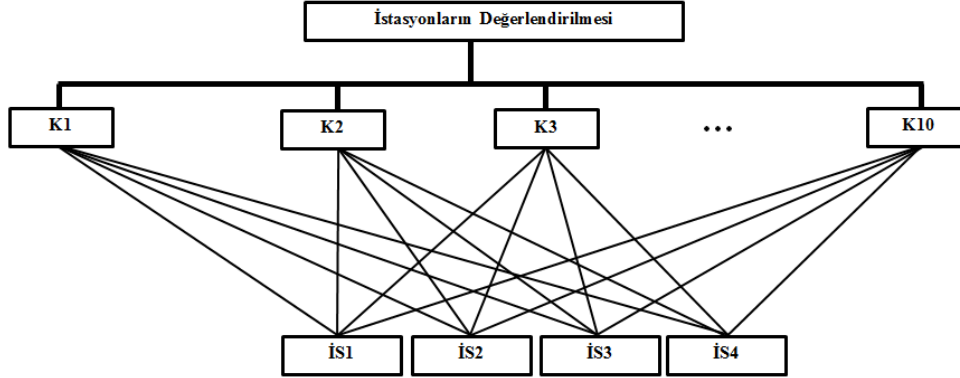
Çizelge 4. Kararlaştırılan kriterler

Kriter sırası	Sembol	Kriter adı	Kriter açıklaması
1	K1	Güvenlik	İstasyon bölgesinin güvenliği
2	K2	Ticari katkı	İstasyon bölgesinin bulunduğu yere sağlayacağı ticari katkı
3	K3	Raylı sistem hatları ile entegrasyon	Demiryolu hattının raylı sistemlerle bağlantısı
4	K4	Arazi yapısı	İstasyon bölgesinin toprak yapısının uygunluğu
5	K5	Yatırım maliyeti	İstasyon bölgesinin inşası için oluşturulan maliyet
6	K6	Endüstri alanlarına yakınlık	Kurulacak istasyonun sanayi bölgelerine yakınlık derecesi
7	K7	Şehir merkezine yakınlık	Kurulacak istasyonun şehir merkezlerine olan yakınlık derecesi
8	K8	Ulaşım imkânı	Kurulacak istasyona toplu ulaşım imkânı
9	K9	Çevresel etki	Kurulacak istasyonun çevreye etkisi
10	K10	Genişleme potansiyeli	Hattın yeni projeler ile genişletilme derecesi

### 3.1.2. Hiyerarşinin Oluşturulması

AHP' de karar verme hiyerarşiye göre yapılır. Karar hiyerarşisi problemin hedefi, ölçütler ve en alt

tarafı değerlendirilecek alternatifler olmak üzere yapılmaktadır. Çalışmanın karar hiyerarşisi Şekil 5'te görünmektedir.



Şekil 5. Probleme ait karar hiyerarşik yapısı

### 3.1.1. İkili Karşılaştırma Karar Matrisinin Oluşturulması

Ölçütlerin ve alternatiflerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile karşılıklı ikili mukayeseler yapılmaktadır. Başta ölçütler kendi aralarında mukayese edilip öz vektörleri hesaplanmış daha sonra her ölçüt için alternatifler ayrı ayrı ikili karşılaştırılmıştır. Ölçütlerin ikili karşılaştırılması Çizelge 5'te sunulmuştur.

İkili karşılaştırma matrisi elde edildikten sonra her sütundaki ölçüt değerleri sütunun değerlerinin toplamına bölünür ve ölçütler ölçüm birimlerinden ayrılarak normalleştirilmiş değer elde edilir.

Daha sonra kriterler için normalleştirme matrisi oluşturulmuştur. Çizelge 6'da normalize edilmiş değerler elde edildikten sonra, oluşturulan her

matrisin satırının ortalaması alınarak ölçütlerin kritik değerlerine ulaşılır.

Ardından kriterler arası normalleştirme matrisi ağırlık değerleri hesaplanmıştır. (Çizelge 6) Ölçütlerin öncelikler vektörü Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Bu ölçütlerin göreceli önem ağırlıkları sırasıyla 0,058; 0,075; 0,055; 0,210; 0,152; 0,093; 0,109; 0,118; 0,061; 0,070 olarak bulunmuştur. Ölçütlerin önem sıralarına bakıldığında karar üzerinde etkili en önemli ölçütün 0,210 ile arazi yapısı olduğu görülür. Ardından yatırım maliyeti diğer kriterlere göre daha önemli bulunmuştur.

Üçüncü sırada öneme sahip kriterin ise ulaşım imkanı olduğu saptanmıştır. En az öneme sahip kriterin ise 0,030 ile raylı sistem hatları ile entegrasyon olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. Kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler arası karşılaştırma matrisi										
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	1,00	0,50	2,00	0,33	0,25	0,33	0,33	0,50	2,00	1,00
K2	2,00	1,00	2,00	0,25	0,33	0,33	2,00	0,33	2,00	0,50
K3	0,50	0,50	1,00	0,50	0,33	0,33	0,33	0,50	2,00	1,00
K4	3,00	4,00	2,00	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	2,00	3,00
K5	4,00	3,00	3,00	0,33	1,00	2,00	0,50	3,00	3,00	2,00
K6	3,00	3,00	3,00	0,33	0,50	1,00	1,00	0,50	0,50	1,00
K7	3,00	0,50	3,00	0,50	2,00	1,00	1,00	0,50	2,00	1,00
K8	2,00	3,00	2,00	0,33	0,33	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00
K9	0,50	0,50	0,50	0,50	0,33	2,00	0,50	0,50	1,00	1,00
K10	1,00	2,00	1,00	0,33	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00
Toplam	20,00	18,00	19,50	4,42	8,58	13,00	10,67	10,33	17,50	13,50

**Çizelge 6.** Kriterler arası normalleştirilme matrisi ve öncelikler vektörü

Kriterler arası karşılaştırma matrisi											Öncelikler vektörü
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	
K1	0,050	0,028	0,103	0,075	0,029	0,026	0,031	0,048	0,114	0,074	0,058
K2	0,100	0,056	0,103	0,057	0,039	0,026	0,188	0,032	0,114	0,037	0,075
K3	0,025	0,028	0,051	0,113	0,039	0,026	0,031	0,048	0,114	0,074	0,055
K4	0,150	0,222	0,103	0,226	0,350	0,231	0,188	0,290	0,114	0,222	0,210
K5	0,200	0,167	0,154	0,075	0,117	0,154	0,047	0,290	0,171	0,148	0,152
K6	0,150	0,167	0,154	0,075	0,058	0,077	0,094	0,048	0,029	0,074	0,093
K7	0,150	0,028	0,154	0,113	0,233	0,077	0,094	0,048	0,114	0,074	0,109
K8	0,100	0,167	0,103	0,075	0,039	0,154	0,188	0,097	0,114	0,148	0,118
K9	0,025	0,028	0,026	0,113	0,039	0,154	0,047	0,048	0,057	0,074	0,061
K10	0,050	0,111	0,051	0,075	0,058	0,077	0,094	0,048	0,057	0,074	0,070
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Daha sonra kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesinde tutarsızlık oranları hesaplanmıştır. Bu oranlar Çizelge 7’de gösterilmektedir. Çizelge 7’deki tutarsızlık oranı hesaplamasına göre

Cr değerinin 0,10’dan küçük olduğu belirlenmiştir. Buna göre kriterler arası ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu söylenebilmektedir.

**Çizelge 7.** Kriterler arası karşılaştırma matrisinin tutarlılık değerleri

Kriterler arası karşılaştırma matrisi											Tutarlılık oranı hesabı					
Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
K1	0,050	0,028	0,103	0,075	0,029	0,026	0,031	0,048	0,114	0,074	0,058	0,631	10,911	11,319	0,147	0,098
K2	0,100	0,056	0,103	0,057	0,039	0,026	0,188	0,032	0,114	0,037	0,075	0,848	11,305			
K3	0,025	0,028	0,051	0,113	0,039	0,026	0,031	0,048	0,114	0,074	0,055	0,595	10,824			
K4	0,150	0,222	0,103	0,226	0,350	0,231	0,188	0,290	0,114	0,222	0,210	2,431	11,601			
K5	0,200	0,167	0,154	0,075	0,117	0,154	0,047	0,290	0,171	0,148	0,152	1,761	11,561			
K6	0,150	0,167	0,154	0,075	0,058	0,077	0,094	0,048	0,029	0,074	0,093	1,070	11,557			
K7	0,150	0,028	0,154	0,113	0,233	0,077	0,094	0,048	0,114	0,074	0,109	1,238	11,403			
K8	0,100	0,167	0,103	0,075	0,039	0,154	0,188	0,097	0,114	0,148	0,118	1,353	11,430			
K9	0,025	0,028	0,026	0,113	0,039	0,154	0,047	0,048	0,057	0,074	0,061	0,679	11,115			
K10	0,050	0,111	0,051	0,075	0,058	0,077	0,094	0,048	0,057	0,074	0,070	0,800	11,487			
<b>Toplam</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000						

Ardından her bir kriter için istasyon alternatiflerinin ikili karşılaştırma matrisleri değerlendirilmiş ve tutarlılıkları ayrı ayrı test edilmiştir. Tutarlılık oranları her kriter için Çizelge 8’de

gösterilmektedir. Çizelge 8’de yer alan tutarsızlık oranlarına bakıldığında her kriter için alternatiflerin tüm ikili karşılaştırmalı matrislerinin 0,10’dan küçük olduğu için tutarlı olduğu söylenmektedir.



Çizelge 8. Her kriter için tutarlılık oranlarının hesaplanması

<b>K1 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,127	0,51764706	4,071504	4,160211959	0,053403986	0,060004479
İS2	0,509	2,19518717	4,316509			
İS3	0,279	1,17072193	4,193966			
İS4	0,085	0,34565508	4,05887			
<b>K2 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,108	0,43248663	4,022996	4,089743822	0,029914607	0,033611918
İS2	0,519	2,19518717	4,227203			
İS3	0,266	1,0855615	4,085779			
İS4	0,108	0,43248663	4,022996			
<b>K3 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,150	0,60280749	4,01524	4,165935643	0,055311881	0,062148181
İS2	0,508	2,19518717	4,321345			
İS3	0,257	1,0855615	4,220562			
İS4	0,085	0,34772727	4,106595			
<b>K4 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,103	0,4322861	4,212141	4,232710829	0,077570276	0,087157614
İS2	0,490	2,26203209	4,614144			
İS3	0,260	1,04318182	4,011317			
İS4	0,147	0,60200535	4,093241			
<b>K5 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,167	0,64518717	3,857044	4,190501072	0,063500357	0,071348716
İS2	0,484	2,26203209	4,671901			
İS3	0,254	1,04318182	4,10703			
İS4	0,095	0,39010695	4,12603			

Çizelge 8. (devamı)

<b>K6 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,136	0,61858289	4,534115	4,261845364	0,087281788	0,098069425
İS2	0,546	2,47433155	4,534115			
İS3	0,211	0,87406417	4,134087			
İS4	0,106	0,4092246	3,845063			
<b>K7 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,217	0,9822861	4,529104	4,204231238	0,068077079	0,076491101
İS2	0,284	1,12713904	3,972069			
İS3	0,216	0,93643048	4,343684			
İS4	0,284	1,12713904	3,972069			
<b>K8 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,167	0,64518717	3,857044	4,190501072	0,063500357	0,071348716
İS2	0,484	2,26203209	4,671901			
İS3	0,254	1,04318182	4,10703			
İS4	0,095	0,39010695	4,12603			
<b>K9 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,147	0,56002674	3,807814	4,110224803	0,036741601	0,041282698
İS2	0,490	2,26203209	4,614144			
İS3	0,260	1,04318182	4,011317			
İS4	0,103	0,41129679	4,007624			
<b>K10 Kriteri tutarlılık oranı hesabı</b>						
Alternatifler	Öncelikler vektörü	Tüm öncelikler matrisi	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	CR
İS1	0,138	0,61858289	4,496072	4,205352897	0,068450966	0,076911197
İS2	0,523	2,38917112	4,572103			
İS3	0,221	0,87406417	3,95654			
İS4	0,119	0,45160428	3,796697			

İstasyonların belirlenen kriterlere göre Çizelge 9'da gösterilmektedir. değerlendirilmesi için oluşturulan karar matrisi

**Çizelge 9.** Kriterlere göre istasyon alternatiflerinin sıralaması

Alternatifler	Kriterlere göre istasyon öncelikleri										Alternatif skorları	Sıralama
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10		
İS1 (Taşkent)	0,127	0,108	0,150	0,103	0,167	0,136	0,217	0,167	0,147	0,138	0,145203	3
İS2 (Tarsus)	0,509	0,519	0,508	0,490	0,484	0,546	0,284	0,484	0,490	0,523	0,47779339	1
İS3 (Venice)	0,279	0,266	0,257	0,260	0,254	0,211	0,216	0,254	0,260	0,221	0,24773339	2
İS4 (Şehitlik)	0,085	0,108	0,085	0,147	0,095	0,106	0,284	0,095	0,103	0,119	0,12927022	4
Öncelikler vektörü	0,058	0,075	0,055	0,210	0,152	0,093	0,109	0,118	0,061	0,070		

Uygulanan AHP yöntemine göre Karar matrisi incelendiğinde tüm kriterler açısından yapılan değerlendirmede Tarsus İstasyonunun diğer istasyonlardan daha öncelikli olduğu görülmüştür.

#### 4. SONUÇ

Türkiye'de YHT hattı projeleri her geçen gün tüm hızıyla artmaktadır. Bu projelerde hattın geçiş güzergahı ve istasyon lokasyonları kentlerin etkilenen bölgelerine çok büyük ekonomik ve sosyal fayda getirmektedir. Hattın güzergahı istikametinde kentin hangi lokasyonuna istasyonun yapılacağı önemli bir karar problemidir. Bu karar verme aşamasında ekonomik, sosyal ve çevresel koşullarını dikkate alan kararların alınması gerekir.

Yatırım maliyetleri açısından oldukça fazla kaynak gerektiren YHT istasyonlarının yer seçiminde uygun yöntemlerin kullanılması ekonomik ve sosyal yaşamı etkilemekte ve değerlendirme prosesini sağlıklı kılmaktadır. Seçim prosesinde belirlenen ölçütler

ve alternatifler arasındaki ilişkileri değerlendirmek için ÇKKV yöntemleri sık sık kullanılmaktadır [29]. Bu teknolojiye proje değerlendirilirken bazı sorunlarla karşılaşabilmektedir. Analitik yöntemlerin kullanılması, matematiksel modelleme ve optimizasyon çalışmaları bu problemlerin çözümünde ve karar verme sürecinde etkilidir.

Yapılan bu çalışmada Mersin-Gaziantep YHT projesinde Adana-Mersin arasında yeni inşa

edilecek olan iki demiryolu için alternatif istasyonlar AHP yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. İstasyon yeri seçimi için önerilen prototip ve literatür çalışmaları dikkate alınarak yapılan çıkarımlar sonucunda kurulacak istasyonların yerleri için dört alternatif istasyon yerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan çıkan veriler doğrultusunda ölçütlere göre en uygun istasyonun Tarsus İstasyonu olduğu ortaya çıkmıştır. Şehitlik İstasyonu ise öncelik sırasında en son sırada yer almıştır.

İleride yapılacak olan araştırmalarda alternatif sayısının daha çok olduğu hatlarda, önerilen bu model uygulanabilir. Ayrıca istasyonların inşaat maliyetleri de göz önünde bulundurularak matematiksel model geliştirilebilir. Bunun yanı sıra ÇKKV tekniklerinden farklı yöntemler kullanılarak alternatif istasyon lokasyonlarının karşılaştırılması gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmanın devam niteliği olarak sadece iki şehir arasındaki istasyonlar için oluşturulan araştırma diğer şehirler arası yer alan istasyonlar için de oluşturulabilir. Bununla birlikte rota belirleme adımında alternatifler bu ölçütlere göre değerlendirilerek optimum lokasyon belirlenebilir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Dinç, S., Hamurcu, M., Eren, T., 2019. Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Hattında İstasyon

- Yerlerinin Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Destekli 0-1 Hedef Programlama Modeli. Demiryolu Mühendisliği, (9), 1-16.
2. Sarımehtem, B., Hamurcu, M., Eren, T., 2020. Çok Kriterli Karar Verme: Kırıkkale YHT İstasyonu-Şehir Bağlantısının Sağlanması. Demiryolu Mühendisliği, (11), 26-40.
  3. Eren, T., Hamurcu, M., Alağaç, H.M., 2017. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Kırıkkale Yüksek Hızlı Tren İstasyon Yerinin Seçimi. In 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan).
  4. Brunner, I.M., Kim, K., Yamashita, E., 2011. Analytic Hierarchy Process and Geographic Information Systems to Identify Optimal Transit Alignments. Transportation Research Record, 2215(1), 59-66.
  5. Dedemen, Y., 2013. A Multi-Criteria Decision Analysis Approach to GIS-Based Route Selection for Overhead Power Transmission Lines. Master's Thesis, Middle East Technical University, 69.
  6. Soltani, A., Marandi, E.Z., Ivaki, Y.E., 2013. Bus Route Evaluation Using a Two-Stage Hybrid Model of Fuzzy AHP and TOPSIS. Journal of Transport Literature, 7, 34-58.
  7. Yıldırım, V., Yomralıoğlu, T., 2013. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Çizgisel Mühendislik Yapılarında Güzergâh Optimizasyonu: Doğalgaz İletim Hattı Örneği. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 1-10.
  8. Alkubaisi, M.I.T., 2014. Predefined Evaluating Criteria to Select the Best Tramway Route. Journal of Traffic and Logistics Engineering, 2(3), 211-217.
  9. Kays, J.T., 2014. Optimal Locations of High-Speed Railway Stations Along Australia's East Coast, AMSI, 7.
  10. Nosal, K., Solecka, K., 2014. Application of AHP Method for Multi-Criteria Evaluation of Variants of the Integration of Urban Public Transport. Transportation Research Procedia, 3, 269-278.
  11. Ahmed, N.G., Asmael, N.M., 2015. A GIS-Assisted Optimal Baghdad Metro Route Selection Based on Multi Criteria Decision Making. Journal of Engineering and Sustainable Development, 19(6), 44-58.
  12. Hamurcu, M., Eren, T., 2015. Ankara Büyükşehir Belediyesi'nde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi İle Monoray Güzergâh Seçimi. Transist, 8, 410-419.
  13. Saat, M.R., Aguilar Serrano, J., 2015. Multicriteria High-Speed Rail Route Selection: Application to Malaysia's High-Speed Rail Corridor Prioritization. Transportation Planning and Technology, 38(2), 200-213.
  14. Keser, S.B., Yazıcı, A., Günel, S., 2016. A Multi-Criteria Heuristic Algorithm for Personalized Route Planning. Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering, 17(2), 299-313.
  15. Kırlangıçoğlu, C., 2017. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Kent İçi Raylı Sistem Koridor Planlaması. Coğrafya Dergisi, (33), 53-71.
  16. El-Hallaq, M.A., Khalid, D., 2017. Metro Route Site Selection in Gaza City using GIS and Spatial Multi Criteria Evaluation. International Journal of Engineering Inventions, 6, 2278-7461.
  17. Hamurcu, M., Eren, T., 2017. Raylı Sistem Projeleri Kararında AHS-HP ve AAS-HP Kombinasyonu. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(3), 1-13.
  18. Taş, M., Özlemiş, Ş.N., Hamurcu, M., Eren, T., 2017. Ankara'da AHP ve PROMETHEE Yaklaşımıyla Monoray Hat Tipinin Belirlenmesi. Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi, 3(1), 65-89.
  19. Lee, D.J., 2018. A Multi-Criteria Approach for Prioritizing Advanced Public Transport Modes (APTM) Considering Urban Types in Korea. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 111, 148-161.
  20. Eren, T., Hamurcu, M., Süt, N.İ., 2018. Analitik Hiyerarşi Süreci Kullanılarak Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Hat Güzergâhının Değerlendirilmesi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 3(3), 22-30.
  21. Hamurcu, M., Eren, T., 2018. An Application of Multicriteria Decision-Making for the Evaluation of Alternative Monorail Routes. Mathematics, 7(1), 16.

22. Sarımehmet, B., Hamurcu, M., Eren, T., 2020. Çok Kriterli Karar Verme: Kırıkkale YHT İstasyonu-Şehir Bağlantısının Sağlanması. Demiryolu Mühendisliği, (11), 26-40.
23. Saaty, T.L., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. Journal of Mathematical Psychology, 15(3), 234-281.
24. Miç, P., Antmen, Z.F., Erdurak, M.Ö., 2019. Öğrencilerin Seçmeli Ders Seçimi Problemine Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı. In G. Başyigit Kılıç, A. Çiftçi, A. Yılmaz (Eds.), Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler,148, Ankara: Gece Akademi.
25. Ayçin, E., 2019. Çok Kriterli Karar Verme: Bilgisayar Uygulamalı Çözümler. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 386.
26. Antmen, Z.F., Miç, P., 2018. Çocuk Yoğun Bakım Ünitesinde Çok Kriterli Karar Verme ile Mekanik Ventilator Seçimi ve Bir Uygulama Örneği. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(4), 17-30.
27. Saaty, T.L., 1990. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, 48, 9-26.
28. Yüksel, F.Ş., Kalan, O., Işık, M., 2022. Havaalanlarında Dijital Dönüşüm Risklerinin Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(3), 781-792.
29. Kayadelen, A.N., 2021. Bulanık TOPSİS Yöntemi ile Bir Mobilya Fabrikası için Bölge Seçimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (31), 71-76.



## Grafen Katkısının Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplanmış 3005 Alaşımının Erozyon Korozyon Davranışı Üzerine Etkisi

Aysun AYDAY\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3719-7006

Yaren BALABAN<sup>1,2</sup> ORCID 0009-0003-8840-7947

Ayça ŞİMŞEK<sup>1</sup> ORCID 0009-0001-8621-1954

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,  
Sakarya

<sup>2</sup>Adapazarı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş., Sakarya

Geliş tarihi: 06.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: AYDAY, A., BALABAN, Y., ŞİMŞEK, A., (2024). Grafen Katkısının Mikro Ark Oksidasyon ile Kaplanmış 3005 Alaşımının Erozyon Korozyon Davranışı Üzerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 47-56.

### Öz

Çalışmada 3005 alüminyum alaşımı, mikro ark oksidasyon (MAO) teknolojisi ile farklı işlem sürelerinde ve farklı oranlarda grafen ilavesi ile yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Kaplanan numunelerin yüzey karakterizasyonu, faz analizi ve erozyon korozyonu testi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrası alaşımın MAO yöntemi ile başarılı bir şekilde kaplandığı, grafen ilavesi ile daha yoğun bir kaplama tabakası elde edildiği ve yüzeydeki porların azaldığı gözlemlenmiştir. MAO sonrası numunelerde erozyon-korozyon dayanımında belirgin bir artış tespit edilmiştir. Artan grafen oranı ile erozyon korozyonu dayanımının iyileşme gösterdiği raporlanmış ve işlemsiz numuneye göre korozyon dayanımında 17,4% oranında iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, 3005, Grafen, Mikro ark oksidasyon, Erozyon korozyonu

### Effect of Graphene Addition on Erosion Corrosion Behavior of 3005 Alloy Coated by Micro-Arc Oxidation Method

#### Abstract

In the study, surface modification of 3005 aluminum alloy was carried out (different coating time and graphene ratios) with micro arc oxidation (MAO) technology. Surface characterization, phase analysis and erosion corrosion test of the coated samples were performed. After the process, it was observed that the alloy was coated successfully with MAO method, a denser coating layer was obtained with the addition of graphene and the pores on the surface were reduced. After MAO coating, it was detected a significant increase in erosion-corrosion resistance. It was determined that there was a 17.4% improvement in corrosion resistance with increasing graphene content.

**Keywords:** Aluminum, 3005, Graphene, Micro-arc oxidation, Erosion corrosion

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Aysun AYDAY, [aayday@sakarya.edu.tr](mailto:aayday@sakarya.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, alüminyum ve alaşımları oldukça geniş bir endüstriyel alanda, tıp, otomotiv, spor, havacılık gibi, birçok alanda kullanılmaktadır. Bunun da sebebi, bilindiği üzere sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek ısıl iletkenlik, geri dönüştürülebilir ve kolay şekillendirilebilir olmaları kullanım alanlarını epey arttırmıştır [1,2].

Bununla birlikte, alüminyum ve alaşımları endüstriyel uygulamalardaki kullanımalarında bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Endüstride kullanılan pek çok malzeme, kullanım yerine bağlı olarak asidik/bazik kimyasallarla temas etmekte, bu durumlara bağlı olarak da farklı hasarlara uğrayabilmekte ve korozyona maruz kalmaktadır. Ayrıca, kimyasal akışların, akış debisi ve içerdiği aşındırıcı partiküller vasıtası ile aşınmaya da maruz kalabilmektedir. Bu iki etkinin bir araya gelmesi ile erozyon korozyonuna maruz kalması hem mekanik hem kimyasal olarak hasara uğradığı anlamı taşımaktadır [1,3-5]. 3005, bir alüminyum ve mangan alaşımıdır. Diğer Al alaşımlarına göre korozyon direnci de daha iyidir [3-5]. Çalışmada kullanılan 3005 alaşımı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş'den tedarik edilmiştir. 3005 alüminyum levha otomotiv sektöründe otomobil altlarında ve diğer nemli ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım yerinden kaynaklı mekanik olarak hasara uğrama yüzdesi oldukça yüksektir.

Alüminyum alaşımlarında bahsi geçen olumsuzlukların ortadan kaldırılması veya geciktirilmesi amacı ile fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, termokimyasal işlemler, plazma kaplama, anodizasyon, mikro ark oksidasyon (MAO) vs. olmak üzere birçok yüzey işlemi ile yüzey özellikleri iyileştirilmesi sağlanmaktadır [2,5]. Mikro ark oksidasyon teknolojisinde numune için herhangi bir ön hazırlık süreci olmaması diğer teknolojilere göre avantaj sağlamaktadır. Bu durum üretim sürecinde zamanda kazanç sağlarken, kaplama öncesi numune

hazırlamada kullanılan kimyasalların doğaya etkilerinin en aza indirilmesini sağlar.

Mikro ark oksidasyon teknolojisi hafif alaşımlara, alüminyum ve alüminyum alaşımlarına, titanyum gibi, magnezyum gibi, zirkonyum gibi geniş bir malzeme ağına uygulanabilmektedir. Benzer teknolojilerden anodizasyon ile kaplanması zor olan yüksek silisyum içeren parçaların ve yine yüksek oranda bakır içeren alüminyum alaşımlarının MAO ile kaplanabilmesi mümkündür. Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan kaplama çözeltileri korozif olmayan, hazırlanması kolay ve ucuz bir karışımdır. Bu hazırlanan karışımın çevreye zararı bulunmamaktadır. MAO işleminde pek çok parametre (çözelti, akım, voltaj, süre) kaplama sonuçlarını etkilediği yapılan çalışmalardan dolayı bilinmektedir. Bu yöntem sayesinde istenilen kalınlıkta oksit tabakası, yüzey sertliği, porozite dağılımı ve oranı, kaplama yapışma dayanımı gibi özellikler optimum işlem parametreleri belirlenerek oldukça düşük maliyette seramik esaslı kaplamalar üretilebilmektedir [6,7].

Yapılan son araştırmalarda, kaplama çözeltilerine ilave edilen takviye malzemeleri ile nano tozlar, seramik takviyeleri gibi kaplamanın mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Chen ve arkadaşları [8], grafen oksidin korozyon dayanımı üzerinde ki olumlu etkisini araştırmışlardır. Ayday ve arkadaşları [9], TiO<sub>2</sub> takviyesinin MAO işleminde Ti alaşımları ve korozyon dayanımı üzerindeki olumlu etkilerini araştırmışlardır. Kaseem ve arkadaşları [10] MoO<sub>2</sub> ve ZrO<sub>2</sub> partiküllerin kaplama karakterizasyonu ve korozyon dayanımına olan etkisi tartışmışlardır. Grafen etkisi son yıllarda özellikle dikkat çeken, MAO kaplama çalışmalarında da etkisi araştırılmak üzere kaplama çözeltilerine katılan takviye elemanıdır. Bu bağlamda MAO yöntemi ile kaplanan malzemelerde grafen etkisinin araştırılması adına yapılan bazı araştırmalar mevcuttur. Liu ve arkadaşları tarafından, MAO ile kaplanan D16T alüminyum alaşımına grafenin kaplama özellikleri üzerine yaptığı etkisi



araştırılmıştır. Çalışmada, kaplama kalınlığının ve kaplama sertliğinin grafen ilavesi ile arttığı, kaplama yüzeyindeki poroziteyi ise azalttığı tespit edilmiştir. Çözeltiye ilave edilen grafenin korozyon dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Yüzeydeki porların azalması ve korozyon dayanımının iyileşmesi grafenin yüksek elektrik iletkenliğine sahip olması ile ilişkilendirilmiştir. Korozyon dayanımı, grafen ilavesi ile MAO prosesindeki elektrik alanı etkilemesi ve yüzeyde kaplama birikiminin artmasıyla açıklanmıştır [11].

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise; grafen ilavesinin farklı bir alüminyum alaşımında (Al6063) olan etkisi ve yüzey özelliklerine olan katkısı araştırılmıştır. Grafen ilavesi ile kaplamada hataların daha az olduğu ve daha uniform bir tabaka elde edildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda da grafen ilavesinin kaplamanın korozyonu arttırdığı rapor edilmiştir [2].

Bu çalışmada unipolar MAO cihazı ile kaplanan 3005 alüminyum alaşımının yüzey karakteristik özellikleri üzerine işlem süresi, grafen etkisi ve çözelti bileşim oranlarının etkisi araştırılmıştır.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Mikro Ark Oksidasyon Kaplama Süreci

Bu çalışmada, 3005 (AlMn<sub>1</sub>Mg<sub>0.5</sub>) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 0.380x210x297 mm ölçülerindeki alüminyum levhadan 0.380x10x15 mm ölçülerinde kaplama numuneleri hazırlanmıştır. Levha yüzeyi kaplamaya hazır halde olduğundan herhangi bir ön işleme tabi tutulmamıştır. Çalışmada kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** AlMn<sub>1</sub>Mg<sub>0.5</sub> kalite alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim (%)							
Ti	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Al
0.015	0.023	0.525	0.128	1.17	0.445	0.056	Kalan

15 kW gücünde bir dış kaynağa sahip bir kaplama ünitesi kullanılarak, MAO kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler farklı konsantrasyonlarda sodyum silikat (%5, %7, %10 g/l) ve grafen (%0.1, %0.2 g/l) banyosunda, sabit voltaj ve akım değerlerinde 5 ve 10 dk kaplama sürelerinde kaplanmıştır. Çözelti pH’ı 11.5-12.2 aralığında ölçülmüştür. Kaplama süresince çözelti sıcaklığı 30 °C’de sabit tutulmuştur. Her numune için yeni çözelti hazırlanıp kaplama işlemi yapılmıştır. MAO işlem parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Kaplama yüzey görüntüleri ve element analizleri SEM (Joel, JSM 6060-LU), EDS analiz test cihazları ile incelenmiştir. Rigaku marka X-Işını difraktometresi faz analizleri için kullanılmıştır. Cihaz 25 kV güç değerlerinde ve numune yüzeyinin 0,2°’lik artışlarla 0-90° arasında taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cu Kα tüpü kullanılmıştır.

**Çizelge 2.** Mikro ark oksidasyon kaplama parametreleri

Deney No	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (% g/l)	Grafen (% g/l)	Süre (Dk.)	pH	Voltaj (V)
1	5	0,1	5	11,5±0,2	500
2	5	0,1	10	11,5±0,2	460
3	5	0,2	5	11,5±0,2	430
4	5	0,2	10	11,5±0,2	460
5	7	0,1	5	11,8±0,2	480
6	7	0,1	10	11,8±0,2	420
7	7	0,2	5	11,8±0,2	460
8	7	0,2	10	11,8±0,2	470
9	10	0,1	5	12,2±0,2	460
10	10	0,1	10	12,2±0,2	440
11	10	0,2	5	12,2±0,2	440
12	10	0,2	10	12,2±0,2	400

### 2.2. Erozyon Korozyonu Testi

MAO işlemi ile 5 dakika süre ile kaplanan numuneler, oda sıcaklığında 24 saat süre ile erozyon korozyonuna maruz bırakılmıştır. Deney, 750 cm<sup>3</sup> saf su dolu beherde, ağırlıkça %3.5 NaCl ve %8 g/l Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu (3µm) ilave edilerek erozif bir ortam hazırlanmıştır. Parçacıklar manyetik karıştırıcı yardımıyla 700 rpm hızında karıştırılan erozyon korozyonu için bir ortam oluşturulmuştur. Erozyon korozyon deneyleri öncesi numunelerin

kütle ölçümleri ve yüzey alanları ölçümleri yapılmıştır. İlk tartımlar yarım saat sonra alınmıştır. Ardından 1 saat, 2 saat, 9 saat ve 24 saat sonrasında ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Deney sonrası numunelerin korozyon hızı verileri hesaplanmış ve 24 saat sonrası SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 1'de erozyon korozyon deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 1. Erozyon korozyonu deney düzeneği ve deney sonu numuneler

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Şekil 2 ve Şekil 3'de MAO kaplama sonrası düşük büyütmede ve yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir. Genel görüntüler incelendiğinde kaplamaların tüm numunelerde başarı ile gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Ancak numunelerde yer yer mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Meydana gelen mikro çatlaklar yüzeyde biriken sıcak kaplama tabakası ile elektrolitik kaplama çözeltisi arasındaki ısıtılmaları sebebiyle oluşum göstermektedir [12]. Artan kaplama süresi ve grafen takviyesi ile azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Grafen ilavesinin artışı ile de elde edilen görsellerin nihai mikro ark oksidasyon görseline daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3'de verilen kaplamaların yüksek büyütmelerde ki SEM görüntülerine göre, düşük sürelerde deşarj kanallarının varlığını açıkça görülmektedir. Artan süre ile deşarj kanallarının (por) azaldığı görülmektedir. Ayrıca, yüksek grafen ile kaplanan numunelerin, daha yoğun bir kaplama tabakası elde edildiği ve artan grafen ile yüzeydeki deşarj kanallarının (porların) azaldığı gözlemlenmiştir.

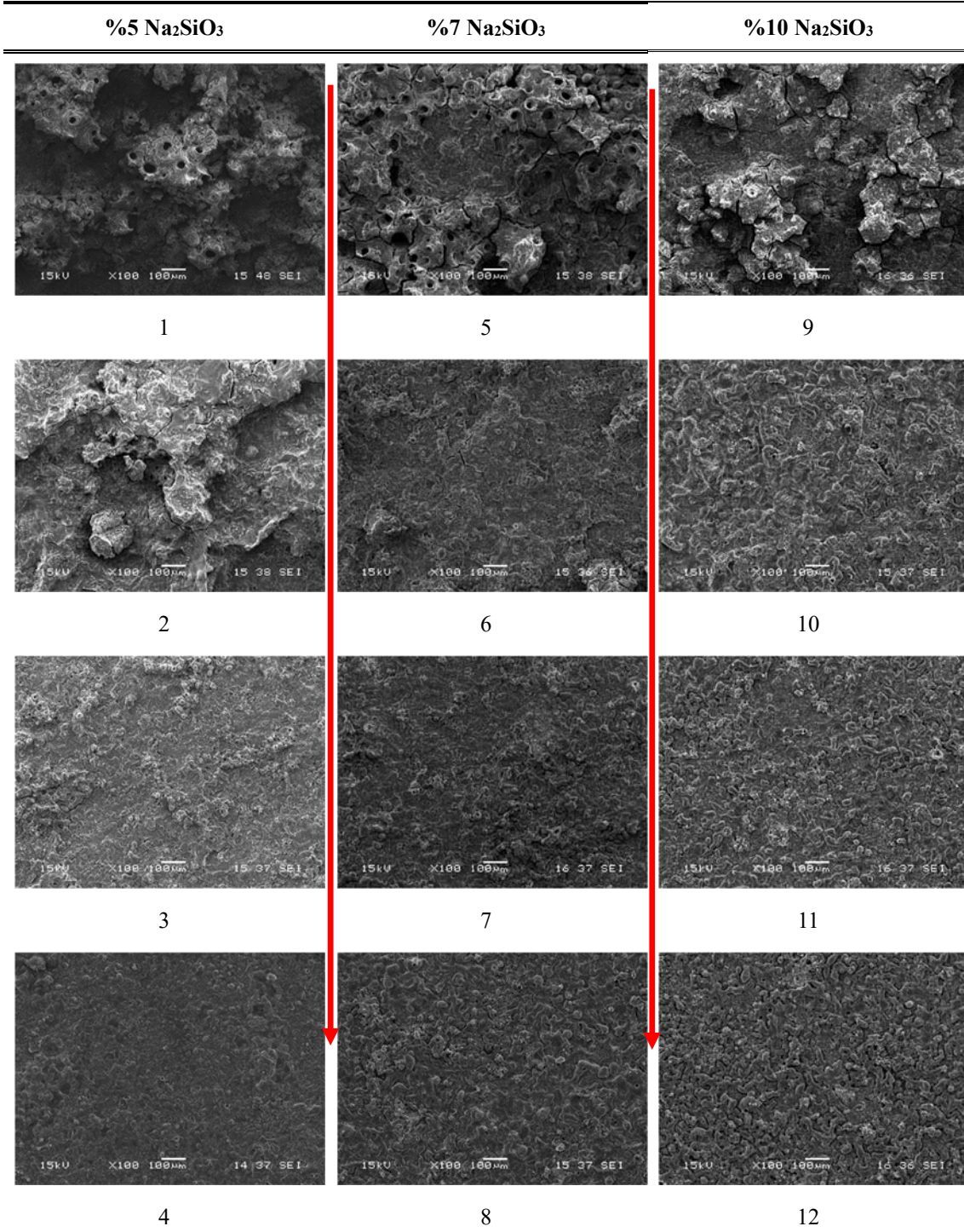
Artan grafen ile azalan porların nedeni, literatüre eş olarak elektrik iletkenliği yüksek olan grafenin MAO prosesindeki elektrik alanı etkilemesi ve kaplamada çözelti birikiminin artmasıyla açıklanmıştır. Ve yapılan inceleme sonrası artan silikat ve süreye bağlı olarak literatüre en yakın mikro ark morfolojisi 11 ve 12 nolu numunelerde elde edilmiştir. Bu durum silikat ilavesi ile artan pH ve elektriksel iletkenliğe bağlı olarak daha homojen ve yoğun bir tabaka elde edildiğine bağlanabilir.

Yapılan literatür çalışmalarında, grafen ilavesiyle, kaplama tabakasında hataların daha az olduğu ve daha uniform bir yapı elde edildiği tespit edilmiştir [2,8,13].

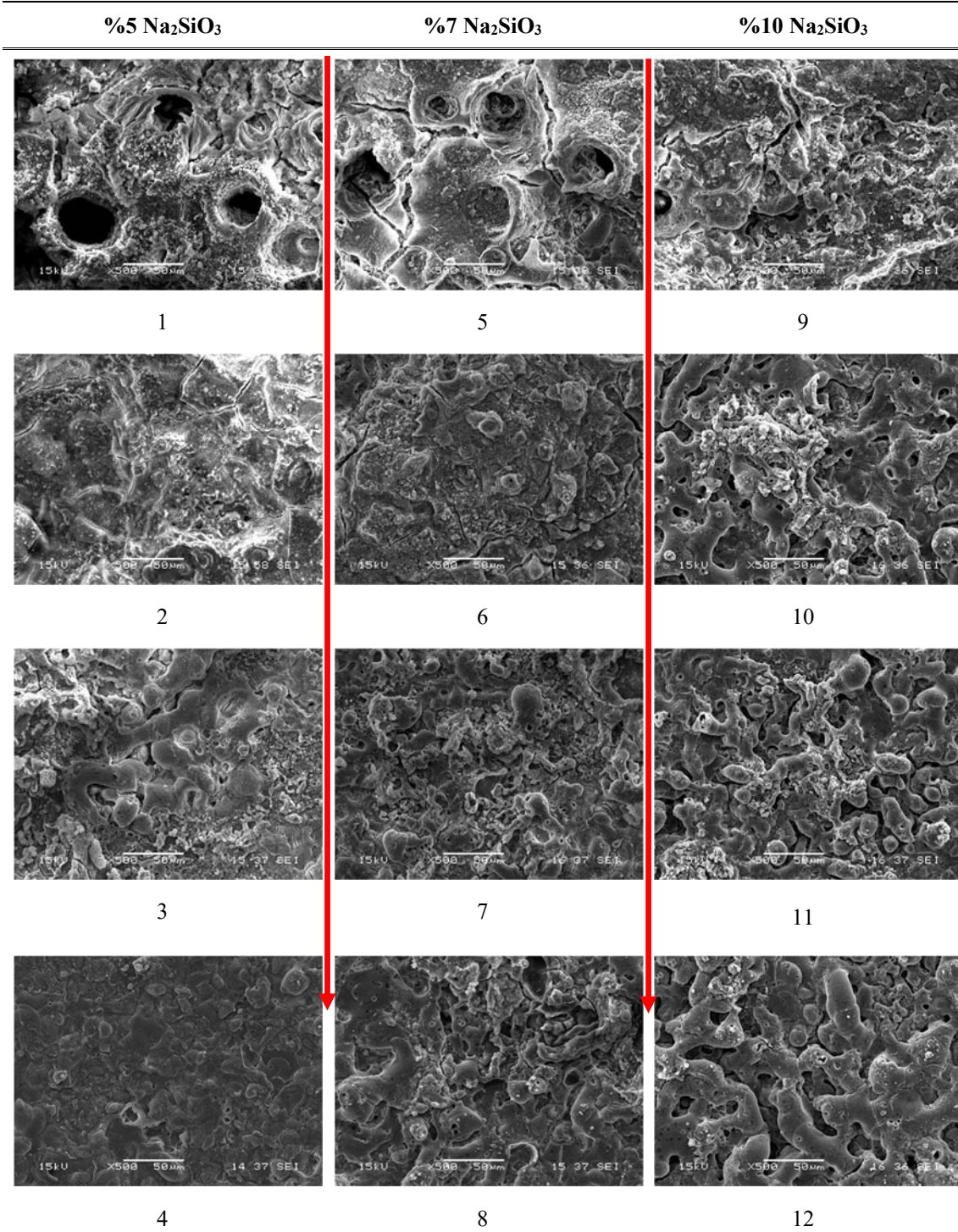
Şekil 4'de 1 nolu numunenin SEM ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Alınan EDS analizine göre yüzeyde Al, O, Na, Mg, Si ve C elementlerine rastlanmıştır. Al, Mg altlıktan gelmektedir. Yüzeyde oksijen elementi olması kaplamanın oksit esaslı seramik olduğu yönünü güçlendirmektedir. Alınan XRD analizleri ile daha detaylı incelenecektir. Kaplamanın yüksek kısımlarında daha çok Si elementi tespit edilmiş olup, Si ve Na ise kaplama çözeltisinden gelmektedir. Kaplamada farklı bir çözelti kullanılmadığı için EDS analizinde farklı bir sonuç beklenmemektedir, sadece elementlerin ağırlıkça yüzdeleri farklılık göstermiştir.

Şekil 5'de 10 dk. işlem süresi ile kaplanan numunelerin tamamı, 8 nolu numune ile işlemsiz 3005 alüminyum alaşım numunesinin XRD analizi sonuçları görülmektedir. Alınan XRD analizleri sonrasında, numune yüzeylerinde alüminyumdan farklı olarak, gama-  $Al_2O_3$ 'e rastlanmıştır. Artan süre ve grafen ilavesine bağlı olarak pik şiddetlerinde artış görülse de farklı faz tespit edilmemiştir.

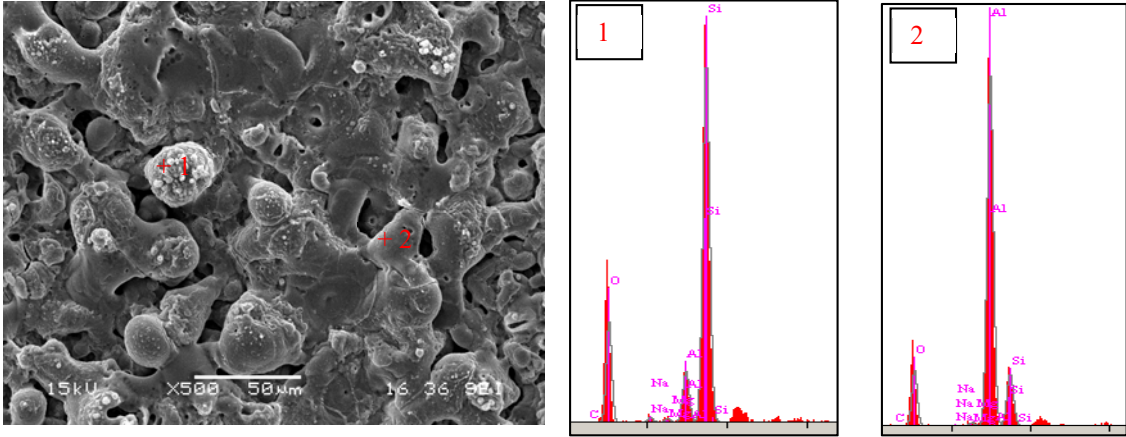
MAO ile büyütülen kaplamalar düşük sıcaklıklarda yarı kararlı faz olan gama-  $Al_2O_3$  oluşmuştur. Yüksek sıcaklıklarda kararlı alfa-  $Al_2O_3$  fazı tespit edilememiştir. Ayrıca bu fazlara ilave olarak 8 nolu numunede kaplama çözeltinin kimyasal bileşimine bağlı olarak müllit ( $Al_{4.95}Si_{1.05}O_{9.52}$ ) fazı da tespit edilmiştir.



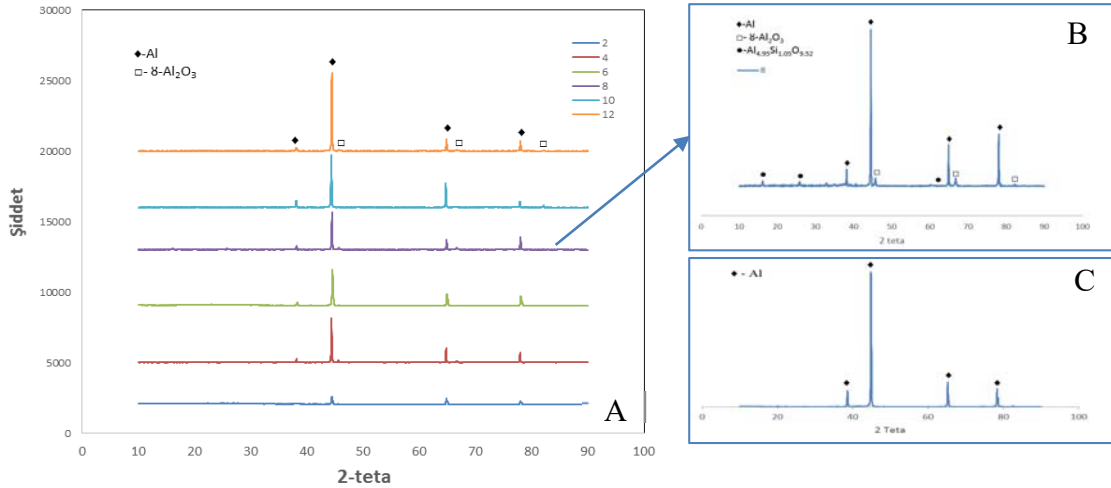
Şekil 2. [1-12] nolu numunelerin sırası ile düşük büyütmedeki SEM görüntüleri



Şekil 3. [1-12] nolu numunelerin sırası ile yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri



Şekil 4. 1 nolu numunenin SEM ve EDS analiz sonuçları

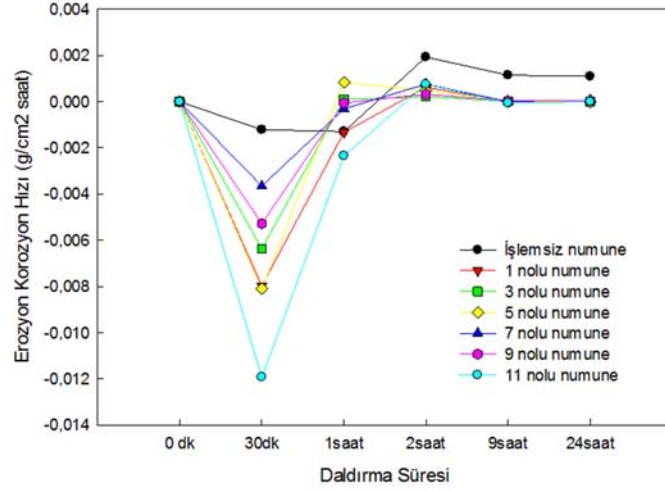


Şekil 5. Numunelerin XRD Grafikleri (A) [2-4-6-8-10-12] nolu numuneler (10dk.), (B) 8 nolu numune ve (C) 3005 işlemsiz numune

Şekil 6'da işlemsiz 3005 ve minimum süre ile kaplanana numunelerin korozyon hızı grafiği verilmiştir. Süre artışı ile daha yoğun kaplama elde edileceği görüşü ile düşük süre ile kaplanan numuneler sadece erozyon korozyonuna tabi tutulmuştur. Grafen ilaveli kaplamalarla ilgili gözenek çaplarını küçülttüğü ve azalttığı görüşü yüzey karakterizasyonun da bahsedilmişti. Grafen ilave edilen numunelerde, artan kaplama yoğunluğundan dolayı korozyon kaybının daha da azaldığını söyleyebiliriz. İşlemsiz numunenin 2 saat sonunda ağırlık kaybına uğramaya başladığını Şekil 6'dan görebiliyoruz. Kaplanan numunelerin, 24 saat

sonrasında ağırlıklarında yüksek oranda azalma olmadığı tespit edilmiştir.

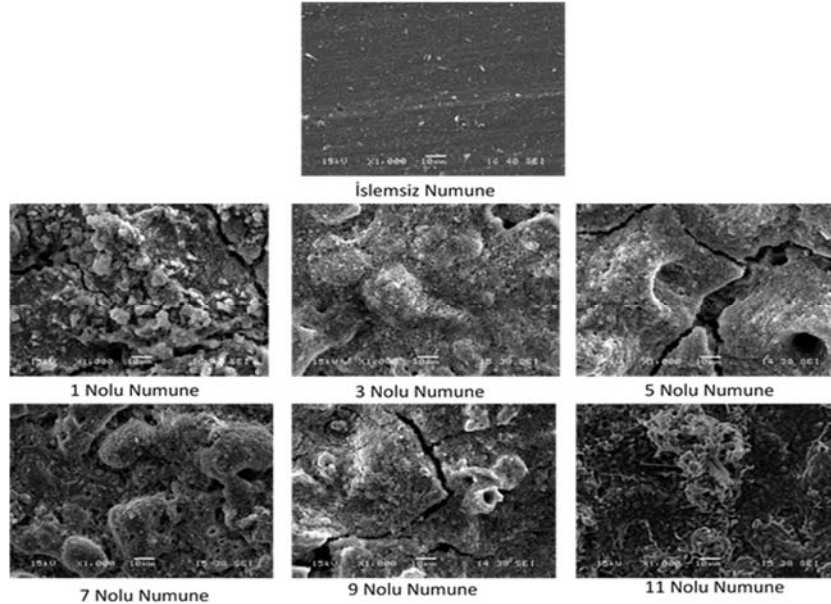
Korozyon testinin sonunda 11 nolu numunenin işlemsiz numuneye göre %17.4 oranında daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, MAO işlemine grafen ilavesinin korozyon ve aşınma direncini artırdığı, MAO kaplamaların dezavantajı olan poroziteli yapının azaldığı ve daha homojen yapıda kaplamalar elde edildiği görülmektedir [2,8,13]. Yapılan çalışmamızda da benzer veriler elde edildiğini alınan sonuçlarımızı desteklediğini söyleyebiliriz [13].



Şekil 6. İşlemsiz Al alaşımı ve minimum süre ile kaplanan numunelerin korozyon hızı grafiği

Şekil 7’de işlemsiz Al ve minimum süre de MAO ile kaplanana numunelerin erozyon korozyonu sonrası SEM görüntüleri, Şekil 8’ de işlemsiz Al ve 11 nolu numunenin EDS analizi sonuçları sırası ile verilmiştir. Erozyon korozyonu sonrası işlemsiz numunede oyuklanmaların (Şekil 8.a) meydana geldiği yüzeyin korozyona uğradığı net bir şekilde görülmektedir.

Grafen oranı düşük olan (1-5-9 nolu) MAO kaplamalarda ise erozyon korozyonu sonrası kaplamada kırılmalar dökülmeler meydana gelmiştir. Alınan veriler ve görseller neticesinde en iyi korozyon dayanımı 11 nolu numunede görülmektedir. Korozyon sonrası kaplama görselini kaybetmediğini yüzeyinde NaCl birikintilerinin olduğu alınan EDS analizi sonrası tespit edilmiştir.



Şekil 7. İşlemsiz Al alaşımı ve minimum sürede MAO ile kaplanan numunelerin erozyon korozyonu sonrası SEM görüntüleri

Elt.	Line	Conc-1	Conc-2	Conc-3	Conc-4	Units
C	Ka	0.000	0.000	0.000	0.000	wt.%
O	Ka	17.327	14.509	10.360	6.825	wt.%
Na	Ka	0.199	0.421	0.273	0.236	wt.%
Al	Ka	70.473	77.560	88.713	89.196	wt.%
Si	Ka	2.333	0.169	0.491	3.541	wt.%
Cl	Ka	9.668	7.341	0.162	0.201	wt.%
		<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.000</b>	<b>wt.%</b>

Elt.	Line	Conc-1	Conc-2	Conc-3	Units
C	Ka	0.000	0.000	0.000	wt.%
O	Ka	33.980	3.536	29.613	wt.%
Na	Ka	2.038	30.978	7.497	wt.%
Al	Ka	61.100	4.024	45.871	wt.%
Si	Ka	0.000	0.100	0.198	wt.%
Cl	Ka	2.881	61.363	16.821	wt.%
		<b>100.000</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>	<b>wt.%</b>

Şekil 8. İşlemsiz Al alaşımı ve 11 nolu numunenin erozyon korozyonu sonrası SEM ve EDS analizleri

#### 4. GENEL SONUÇLAR

Uygulanan farklı sürelerde ve farklı oranlarla ilave edilen grafen takviyesinin kaplama dayanımı üzerine olan etkisi araştırılmış olup, MAO işlemi sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- MAO işlemi sonrasında tüm numune yüzeylerinde oksit tabakası oluşmuştur. Oluşan oksit tabakası  $\gamma$ - $Al_2O_3$  formundadır.
- Kaplama tabakası grafen ilavesine ve artan süreye bağlı olarak daha homojen ve yoğun bir oluşum sergilemiştir. Kaplama süresinin artmasıyla beraber yüzeyde daha çok birikme olmasına neden olmuştur.

Yapılan erozyon korozyonu deneyi sonrasında kaplanan numunelerin korozyon dayanımlarında iyileşme görülürken, en iyi sonuçlar grafen takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Erozyon

korozyon testinin sonunda 11 nolu numunenin işlemsiz numuneye göre %17,4 oranında daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim dalında bitirme tez çalışması olarak başarıyla tamamlanmıştır.

Çalışmaya Adapazarı TKG Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.'ye alüminyum sarf desteklerinden dolayı teşekkür ediyoruz.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Ling K., Mo Q., Lv X., Qin G., Yang W., Li, L., Li, W., 2022. Growth Characteristics and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation

- Coating on Al–Mg Composite Plate. *Vacuum*, 195, 110640.
2. Chen, Q., Jiang, Z., Tang, S., Dong, W., Tong, Q., Li, W., 2017. Influence of Graphene Particles on the Micro-Arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties. *Applied Surface Science*, 423, 939-950.
  3. Dai, W., Zhang, C., Zhao, L., Li, C., 2022. Effects of Cu Content in Al-Cu Alloys on Microstructure, Adhesive Strength, and Corrosion Resistance of Thick Micro-Arc Oxidation Coatings. *Materials Today Communications*, 33, 104195.
  4. Korkmaz, K., Çakır, A., 2017. Mikro-Ark Oksidasyon Yöntemi İle Oksitlenen 2017A Alüminyumun Erozyon- Korozyon Direncinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 979-983.
  5. Huang, J., Dun, Y., Wan, Q., Wu, Z., Zhao, X., Tang, Y., Zhang, X., Zuo, Y., 2022. Improved Corrosion Resistance of MAO Coating on Mg-Li Alloy by RGO Modified Silanization. *Journal of Alloys and Compounds*, 929, 167283.
  6. Zhang, J., Dai, W., Wang, X., Wang, Y., Yue, H., Li, Q., Yang, X., Guo, C., Li, C., 2023. Micro-Arc Oxidation of Al Alloys: Mechanism, Microstructure, Surface Properties, and Fatigue Damage Behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4307-4333.
  7. Guan, S., Qi, M., Li, Y., Wang, W., 2020. Morphology Evolution of the Porous Coatings on Ti-xAl Alloys by Al Adding Into Ti During Micro-Arc Oxidation in Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 395, 125948.
  8. Chen, Y., Wu, L., Yao, W., Wu, J., Yuan, Y., Xie, Z., Jiang, B., Pan, F., 2022. Synergistic Effect of Graphene Oxide/Ternary Mg-Al-La Layered Double Hydroxide for Dual Self-Healing Corrosion Protection of Micro-Arc Oxide Coating of Magnesium Alloy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 655, 130339.
  9. Ayday, A., 2018. Coatings of Bioactive TiO<sub>2</sub> Films on Ti6Al4V Alloy by Micro Arc Oxidation. *Acta Physica Polonica A*, 134.
  10. Kaseem, M., Lee, Y.H., Ko, Y.G., 2016. Incorporation of MoO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> Particles Into the Oxide Film Formed on 7075 Al Alloy Via Micro-Arc Oxidation. *Materials Letters*, 182, 260-263.
  11. Liu, W., Liu, Y., Lin, Y., Zhang, Z., Feng, S., Talha, M., Shi, Y., Shi, T., 2019. Effects of Graphene on Structure and Corrosion Resistance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on D16T Al Alloy. *Applied Surface Science*, 475, 645-659.
  12. Sundararajan, G., Krishna, L.R., 2003. Mechanisms Underlying the Formation of Thick Alumina Coatings Through the MAO Coating Technology. *Surface and Coatings Technology*, 167, 269-277.
  13. Aydin, F., Ayday, A., Turan, M.E., Zengin, H., 2020. Role of Graphene Additive on Wear and Electrochemical Corrosion Behaviour of Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings on Mg–MWCNT Nanocomposite. *Surface Engineering*, 36(8), 791-799.



## Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Performans Analizi

Netice DUMAN\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9926-8511

Ahmet Gürkan YÜKSEK<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-7709-6360

Mustafa CANER<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-3674-7881

Ertan BUYRUK<sup>3</sup> ORCID 0000-0002-6539-7614

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas TBMYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sivas

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sivas

<sup>3</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas

Geliş tarihi: 22.05.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: DUMAN, N., YÜKSEK, A.G., CANER, M., BUYRUK, E., (2024). Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Toprak Kaynaklı Isı Pompasının Performans Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 57-72.

### Öz

Isı pompaları, binalarda soğutma ve ısıtma için kullanılan konvansiyonel sistemlere verimli ve ulaşılabilir alternatiflerdir. Isı kaynağı olarak toprak ısınısını kullanan toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP), ısıtma ve soğutma yüklerini temiz ve sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için umut verici teknolojilerdir. TKIP, kurulum ve işletme maliyetleri yüksek olan bir sistemdir. Bu nedenle verimlilik açısından farklı sektörlerde kullanımı uygun olan TKIP sistemini kurmadan performans analizleri yapılabilir olması çok önemlidir. Sistemler kurulmadan önce performans değerlerinin tahmin edilebilecek olduğu modeller ile değerlendirilmesi yaklaşımdan yola çıkılarak, ısı pompası ve sistemin performansı ve yoğunlucudan atılan ısıyı tahmin etmek için bir yapay sinir ağı (YSA) modeli önerilmektedir. Yapay sinir ağları ile regresyon analizi, girdi ve çıkış verileri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenme yeteneğine sahip bir makine öğrenimi yöntemidir ve problemlerindeki non-lineer ilişkileri etkili bir şekilde modelleyebilir. Sivas ilinde kurulan deneysel sistem ile ölçülen veriler, YSA'yı eğitmek için eğitim verisi ve test verisi olarak ayrılmıştır ve modelin ilk aşamasında eğitim verisi; ikinci aşamasında ise test verisi kullanılmıştır. Sunulan çalışmada, yatay TKIP'in performans katsayısını tahmin etmek için çeşitli uygulamalarda kullanılmış ve özellikle sistem modelleme ve sistem tanımlamada yararlı oldukları gösterilmiş yapay sinir ağlarının uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda, ısı pompası COP R<sup>2</sup> değeri 0,9733, TKIP sistemi COP R<sup>2</sup> değeri 0,9896 ve yoğunlucudan atılan ısı YSA modelinin R<sup>2</sup> değeri 0,9878 olduğu tespit edilmiştir. Üretilen istatistiksel belirleyiciler üzerinden yola çıkılarak YSA'ların TKIP sisteminde doğru bir yöntem olarak COP tahmini için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak kaynaklı ısı pompası, Performans analizi, Isıtma, Yapay sinir ağları, Regresyon analizi

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Netice DUMAN, [nduman@cumhuriyet.edu.tr](mailto:nduman@cumhuriyet.edu.tr)

## Performance Analysis of Ground Source Heat Pump With Artificial Neural Networks Approach

### Abstract

Heat pumps are efficient and accessible alternatives to conventional systems used for cooling and heating in buildings. Ground Source Heat Pumps (GSHP), using ground heat as the heat source, are promising technologies to meet heating and cooling loads in a clean and sustainable way. GSHP is a system with high installation and operating costs. For this reason, it is very important that performance analyzes can be made without installing the GSHP system, which is suitable for use in different sectors in terms of efficiency. An artificial neural network (ANN) model is proposed to predict the performance of the heat pump and system and the heat removed from the condenser, starting from the approach of evaluating the performance values with models from which the systems can be estimated before they are installed. Regression analysis with artificial neural networks is a machine learning method that has the ability to learn complex relationships between input and output data and can effectively model non-linear relationships in problems. The data measured by the established in Sivas province experimental system are separated as training data and test data to train the ANN and in the first stage of the model, the training data; In the second stage, test data was used. In the presented study, the applicability of artificial neural networks, which have been used in various applications to estimate the coefficient of performance of horizontal GSHP, and which have been shown to be especially useful in system modeling and system description, has been demonstrated. As a result of this study, it was determined that the COP R<sup>2</sup> value of the heat pump was 0,9733, the COP R<sup>2</sup> value of the TKIP system was 0,9896, and the R<sup>2</sup> value of the ANN model of the heat removed from the condenser was 0,9878. Based on the statistical determinants produced, it was concluded that ANNs can be used for COP estimation as an accurate method in the GSHP system.

**Keywords:** Ground source heat pump, Performance analysis, Heating, Artificial neural network, Regression analysis

### 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji tüketimi, teknolojik gelişmelerin etkisiyle insan hayatının her alanında sürekli artış göstermektedir. Bu enerji tüketimini karşılayabilmek için enerji üretiminde doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtların yaygın olarak kullanılması ve bu yakıt rezervlerinin ömrünün sınırlı olması yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Fosil yakıtlar, tüketilebilir olmasının yanı sıra hava ve su kirliliğine, bitki örtüsünün ve toprak özelliklerinin bozulmasına ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik dünya çapında artan talep, yeni bir enerji tasarrufu çağına yol açmıştır. Yüksek karbon emisyonuna sebep olan enerji kaynaklarının küresel çevre kirliliğini artırması endişeleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması

gerekliliğini beraberinde getirmiştir. Sürdürülebilir enerji kullanımına yönelik küresel çabaların bir parçası olarak, ısı pompalarına olan ilgi son yıllarda artmıştır. Çevre dostu yeşil ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan TKIP, ısıyı topraktan alan veya toprağa atan; ısıtma, soğutma ve sıcak su sağlayan bir enerji sistemidir. Isıtma modunda, TKIP termal enerjiyi dış ortamdan iç ortama aktarırken, soğutma modunda ısı daha sıcak iç ortamdan daha soğuk toprağa aktarılır. TKIP teknolojisinin diğer bir avantajı toprak sıcaklığının yıl boyunca sabit kalması ve diğer sistemlerle de entegre edilebilir olmasıdır [1]. TKIP gibi ilk yatırım maliyeti yüksek olan, gelecek vaat eden enerji tasarrufu teknolojilerinin yaygınlaşması son derece önemlidir. TKIP sistem performansı, toprakaltı devresinin oluşturulması, toprak sıcaklığı, ekipman verimliliği gibi faktörlerden etkilendiğinden deneysel çalışmalar ile analiz yapılmaktadır.

Birçok sektörde olduğu gibi bilgisayar ve veri teknolojileri, nesnelerin interneti gibi akıllı enerji sistemlerinin artması ile performans analizlerinin sistem kurulmadan yapılması önem kazanmıştır. Son yıllarda deneysel çalışmaların yanında gerek dikey tip gerekse yatay tip ısı pompalarının ısı transferi performanslarını analiz etmek için araştırmacılar sayısal çalışmalara yönelmişlerdir. Isı pompası sistemlerinin performansı, analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak analiz edilir. TKIP'ın performansını tahmin etmek için sınırlı matematiksel modeller mevcuttur. Enerji alanında yaygın olarak kullanılmakta olan tahmin metodolojileri;

- Doğrusal regresyon ve otomatik gerileyen bütünleşmiş hareketli ortalama (ARIMA) gibi istatistiksel yöntemler;
- Yapay sinir ağı (YSA), destek vektör makinesi (DVM) ve Gauss işleme (GP) gibi yapay zekâ yöntemleri;
- Energy Plus (E+) ve TRNSYS olmak üzere mühendislik benzetim yöntemleri şeklindedir [2].

Özellikle soğutma, iklimlendirme ve ısı pompaları sistemlerinde makine öğrenme yapıları için ileri beslemeli sinir ağları, uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarma sistemleri, radyal temelli işlevli sinir ağları ve tekrarlayan sinir ağı modelleri uygulanmaktadır. Biyolojik sinir ağları olarak da bilinen YSA, açıklayıcı değişkenler ile yanıt değişkenleri arasındaki fonksiyonel ilişkiyi yaklaşık olarak tahmin eden bir tür sayısal analiz tekniğidir. İleri beslemeli sinir ağı, sinyal iletimi veya atık olmadan girişlerden çıkışa tek yönlü sinyal iletimi sağlamaktadır. Uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi, gelişmiş performans için mantık tekniklerine dayanan bir tahmin yöntemidir. Oto-ilişkisel sinir ağı olarak da bilinen tekrarlayan sinir ağı, ileri ve geri sinyal aktarım değiştirmeyi sağlayan çevrimsel bağlantılara sahip modellemedir.

Yapay sinir ağları, sağlık sektörü [3], meteorolojik tahminler [4], kurutma prosesleri [5], imalat sektörü [6] ve enerji sistemlerinin modellenmesi [7-9] gibi farklı uygulama alanlarında incelenen sistemlerin davranışlarını simüle etmek ve çözümlerini

optimize etmek için bir araç olarak kullanılmıştır. YSA modelleri ve toprak kaynaklı ısı pompalarının analizi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [10-13]. Araştırmacılar tarafından deneysel çalışmaların yanında yapay sinir ağları yaklaşımı ile toprak kaynaklı ısı pompasının performans analizi başarılı bir şekilde uygulanabileceği gösterilmiştir. Örneğin, farklı kütle oranlarına sahip soğutucu akışkan karışımı R12/R22 olan bir ısı pompasının performansı Arcaklıoğlu ve arkadaşları [14] tarafından YSA kullanılarak tahmin edilmiştir. Giriş katmanında karışım oranını, buharlaştırıcıya giren soğutucu akışkan sıcaklığı ve yoğuşturucu basıncını temsil eden üç nöron ve çıkış katmanında COP ve ekserji verimini temsil eden iki nöron içeren bir model geliştirilmiştir. Çalışmada Levenberg-Marguardt (LM) öğrenme algoritması ile çoklu belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değeri 0,999 olarak tespit edilmiştir. YSA tekniği bir grup araştırmacı [15,16] tarafından, yatay ve dikey toprak kaynaklı bir ısı pompasının performansını tahmin etmek için başarıyla uygulanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında; COP, yoğuşturucu ünitesine giren hava sıcaklığı, yoğuşturucu ünitesinden çıkan hava sıcaklığı ve giriş katmanındaki toprak sıcaklıkları (1 ve 2 m derinlikte) gibi üç parametreye atıfta bulunularak tahmin edilmiştir. 3-7-1 konfigürasyonlu LM öğrenme algoritmasının, yatay toprak kaynaklı ısı pompası COP'sini deneysel sonuçlara yakın öngördüğü bildirilmiş ve  $R^2$  değeri 0,9999 belirlenmiştir. Esen ve arkadaşları [17] tarafından, minimum veri seti ile tahmin etmeyi öğrenmek için istatistiksel ağırlıklı bir ön işleme yöntemiyle hibrit YSA modeli ile TKIP sistemlerini performansı araştırılmıştır. Eğitim ve test verilerinin elde edilmesi için deneysel çalışmalar tamamlanmış, yoğuşturucu ünitesine giren ve çıkan hava sıcaklığı, yatay toprak ısı eşanjörüne giren ve çıkan su-antifriz karışımı sıcaklığı ve toprak sıcaklığı gibi beş giriş değişkeni ile COP çıkış değişkeni olacak şekilde model oluşturulmuştur. Çalışmanın sonuçlarında,  $R^2$  0,9999 olarak bulunmuş ve hibrit YSA modeli kullanılarak daha hızlı ve basit çözümler yapıldığı belirtilmiştir. Mohanraj ve arkadaşları [18] doğrudan genleşmeli güneş destekli ısı pompasının enerji performansı tahmini için bir YSA modeli geliştirmişlerdir. LM varyantını kullanan YSA modeli, 2-10-4 yapılandırması için

optimize edilmiş ve  $R^2$  değeri 0,9999 olan deneysel değerlere yakın tahminler elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Wang ve arkadaşları [19], yatay TKIP sisteminin performansını tahmin etmek için YSA'nın uygulanabilirliğini açıklamışlardır. Deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak makine öğrenme modeli geliştirilmiştir. Araştırmacıların elde ettiği sonuçlar, TKIP sistemlerinin performansının güvenilir ve doğru bir şekilde tahmin edileceğini göstermiştir. Benli ve arkadaşları [20] araştırmalarında, yapay sinir ağlarını, toprak, yoğunlaştırıcı, fan-coil ünitesine giren ve çıkan hava sıcaklıklarının TKIP sisteminin performans katsayısına etkisini tahmin etmek için kullanmışlardır. Maksimum korelasyon katsayısı  $R^2$ 'nin 0,999 olduğunu göstererek TKIP sisteminin ısıtma performans katsayısının tahmini için yapay sinir ağlarının kullanımının kabul edilebilir olduğunu doğrulamışlardır. Sun ve arkadaşları [21] bir diğer çalışmada, TKIP sisteminin COP'sini tahmin etmek için, YSA ve uyarlanabilir bir nörobülün çıkarma sistemi ANFIS modeli oluşturmuşlardır. Deneysel çalışma ile elde ettikleri eğitim ve test verileri ile oluşturulan gizli katmanda farklı nöronlara sahip YSA modelleri istatistiksel doğrulama sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır. Gizli katmanda beş nöronlu modellerin, ısı pompasının ve sistemin COP'lerini tahmin etmek için en uygun yapı olduğu görülmüştür. Hastane ısıtılması için yapılan bir çalışmada, Park ve arkadaşları [22] tarafından Kasım 2016'dan Mart 2017'ye kadar elde edilen deneysel veriler kullanılarak TKIP sistem performans analizi çoklu doğrusal regresyon (MLR) ve YSA tahmin modelleri ile yapılmıştır. Puttige ve arkadaşları [23] çeşitli ısı pompası modellerinin performansını değerlendirmek için geniş bir saha ölçümü veri seti kullanılmışlardır. Çalışmalarında, üç farklı ısı pompasından ölçülen veriler ile beş regresyon ve iki YSA modelini karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak 3 girişli YSA modelinin hata oranının düşük olduğu ve özellikle giriş ve çıkış parametrelerinin seçim esnekliğinin YSA modellerini cazip hale getirdiği görülmüştür. Shin ve Cho [24] yaptıkları çalışmalarında, yapay sinir ağı, destek vektör makinesi, rastgele orman ve K-en yakın komşu modelleri kullanılarak ısı pompası sisteminin performans tahmin modeli geliştirmiştir. Üniversite laboratuvarında kurulan ısı pompası sisteminin işleyiş verileri ölçülmüş ve

her bir makine öğrenmesi için bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Elde edilen tahmin modelleri arasında en yüksek doğruluk oranına sahip olan yapay sinir ağı modeli olmuştur. Liu ve arkadaşları [25] tarafından yapılan çalışma kapsamında, TKIP sistemlerinin uzun vadeli performansının elde etmek amacıyla dikey toprak ısı eşanjörü (GHE), ısı pompası ve bina yükünün birleştirildiği model geliştirilmiştir. Parametrik modelleme için COMSOL ve MATLAB'ın ortak simülasyonu kullanılarak, 600 set TKIP sistem modelinin tüm yıl boyunca dinamik simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlar kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuş ve bu veri tabanından öğrenmek üzere YSA metodolojisi kullanılarak bir tahmin modeli geliştirilmiştir.

TKIP'ın ısı transfer performansını analiz etmek için elbette deneysel çalışmalar en doğru ve hassas olanıdır. Deneysel çalışmalardaki ölçümlerin hassasiyet analizleri ile de değerlendirilmesi yapılan çalışmalara daha çok değer katacaktır ancak araştırmacıların sahip oldukları deney sistemlerinde ölçüm yapamama, deney sistemlerinin ölçüm limitlerinin dışına çıkma vb. durumlarında sayısal çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Yukarıda verilen literatür çalışmalarında görüldüğü üzere gerek deneysel gerekse sayısal olarak TKIP'ın ısı transfer performansı üzerine bir çok çalışma mevcuttur. Sunulan bu çalışmada Sivas'ta kurulmuş ve deneysel çalışmaları yapılmış olan TKIP'ın performans kriteri olan COP belirlemesinin YSA yöntemi ile de karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Regresyon analizi teorilerine ve makine öğrenimi yaklaşımlarına dayanan bu çalışmada, TKIP sisteminin ısıtma sezonu için performans katsayısının yanında ısı pompası COP ve yoğunlaştırıcıdan atılan ısının tahmin edilmesi için YSA yaklaşımı ile analiz yapılmıştır.

## 2. SİSTEM TANIMI VE VERİ ANALİZİ

### 2.1. Deney Sisteminin Kurulması

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bir yüksek lisans tez çalışmasında üniversite yerleşkesinde bulunan ve enerji evi olarak

adlandırılan bir binanın ısıtılması için yatay TKIP sistemi kurulmuştur [26]. 30 m<sup>2</sup> taban alanına sahip üç odalı enerji evi fotoğrafı ve sistem planı Şekil 1’de verilmiştir.



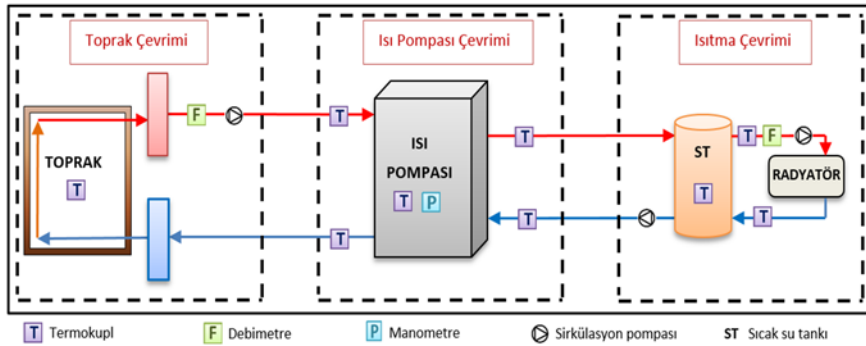
Şekil 1. Enerji evi (a) dış cepheden görünüş, (b) sistemin planı

Şekil 2’de şematik gösterimi verilen yatay TKIP sistemi temel olarak üç çevrimden oluşmaktadır. Toprak çevriminde salamura (su – antifriz karışımı) kullanılarak topraktan ısı çekilmiştir. Topraktan çekilen ısı, ısı pompası çevriminin elemanlarından biri olan buharlaştırıcıda soğutucu akışkana

aktarılmıştır. Kompresörde basıncı ve sıcaklığı artırılan soğutucu akışkan yoğunlaşırken ısıtma suyuna ısı vermiştir. Isıtma suyu radyatörlerde dolaştırılarak ortam ısıtması sağlanmıştır. Şekil 3(a) ve (b)’de toprak altı ısı değiştirici ve toprak hattı kollektörlerinden oluşan ısıtma çevrimi Şekil 3(c)’de ise ısı pompası sistemi görülmektedir.

## 2.2. Veri Analizi

Deneyler sırasında T tipi ısı çiftleri kullanılarak toprak sıcaklıkları, tüm çevrimlerdeki sıcaklıklar, manometreler ile alçak ve yüksek basınçlar, sayaçlar ile salamuranın ve ısıtma suyunun debileri, şebeke analizörleri ile kompresörün ve dolaşım pompalarının güç tüketimleri ölçülmüştür. Deneyler Aralık ayı boyunca gerçekleştirilmiş ve veriler bir dakika aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda ısı pompasının devrede olduğu zaman dilimindeki ortalama değerler kullanılmıştır. Dış ortam sıcaklığı, toprak altı eşanjörlerin çevresindeki sıcaklık (250 cm derinlikte), su-antifriz karışımının toprak ısı değiştiricisine gidiş ve dönüş sıcaklıkları ve soğutucu akışkanın ısı pompasının temel elemanlarına giriş ve çıkış sıcaklıkları olmak üzere YSA modelinde 9 adet giriş parametresi belirlenmiştir. Belirlenen bu giriş parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak ısı pompasının COP değeri (Model 1) ve TKIP sistemin COP değeri (Model 2) ve yoğunlaştırıcıda ısıtma suyuna aktarılan ısı  $Q_y$  (Model 3) tahmin edilmiştir. YSA modelinde kullanılmak üzere her bir parametreye ait 640’ar adet deneysel veri kullanılmıştır.



Şekil 2. Sistemin şematik gösterimi



Şekil 3. Sistem elemanlarının resimleri (a) toprakaltına döşenen borular, (b) gidiş -dönüş kolektörleri, (c) ısı pompası bağlantısı

**Çizelge 1.** Modellemede kullanılan ölçülen sıcaklık değerleri

T1	Salamuranın buharlaştırıcıya giriş sıcaklığı
T2	Salamuranın buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığı
T3	Soğutucu akışkanın buharlaştırıcıya giriş sıcaklığı
T4	Soğutucu akışkanın buharlaştırıcıdan çıkış sıcaklığı
T5	Soğutucu akışkanın yoğuşturucuya giriş sıcaklığı
T6	Soğutucu akışkanın yoğuşturucudan çıkış sıcaklığı
T7	Dış ortam sıcaklığı
T8	2,5 m derinliğinde toprak sıcaklığı
T9	Soğutucu akışkanın kompresöre giriş sıcaklığı

YSA ile regresyon analizi, bir makine öğrenimi yöntemi olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, bir yapay sinir ağı, girdi verileriyle çıkış verileri arasındaki ilişkiyi öğrenmeye çalışarak regresyon analizi yapar. YSA, genellikle çoklu katmanlı perceptronlardan oluşur ve öğrenme süreci, ağırlıkların ve bias'ların uyarlanmasıyla gerçekleşir. Bu sayede, girdi verilerinden çıkış verilerini tahmin etmek için bir model oluşturulur ve regresyon analizi yapılır. Yapay sinir ağları, karmaşık ve non-lineer ilişkileri modelleme yetenekleri nedeniyle regresyon problemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilirler.

Korelasyon matrisi, bir veri setindeki değişkenler arasındaki ilişkileri ölçen bir matris türüdür ve genellikle Pearson korelasyon katsayısı gibi istatistiksel ölçümleri içerir. Korelasyon, iki değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü gösterir, veri analizi ve istatistiksel modellendirme süreçlerinde iki değişken arasındaki ilişkiyi anlamak ve hangi değişkenlerin birbirleriyle nasıl ilişkili olduğunu görmek için kullanılır. Çizelge 2' de Model 1, IP COP'si, Çizelge 3'de Model 2, TKIP sisteminin COP'si ve Çizelge 4'de Model 3, yoğuşturucudan atılan ısının tahmininde kullanılan veri setleri arasındaki ilişkiyi açıklayan korelasyon matrisleri verilmiştir.

**Çizelge 2.** Model 1 kullanılan girişlere ait COP korelasyon matrisi

Çıkış	Giriş	Korelasyon	FDR
COP	T9	0,816	6,39616e-153
COP	T4	0,767	2,39356e-124
COP	T6	0,762	5,54557e-122
COP	T5	0,731	1,93091e-107
COP	T7	0,713	4,65612e-100
COP	T1	0,71	5,38166e-99
COP	T2	0,432	2,35887e-30
COP	T8	-0,2	3,64877e-07
COP	T3	-0,208	1,26599e-07

**Çizelge 3.** Model 2 kullanılan girişlere ait COPSYS korelasyon matrisi

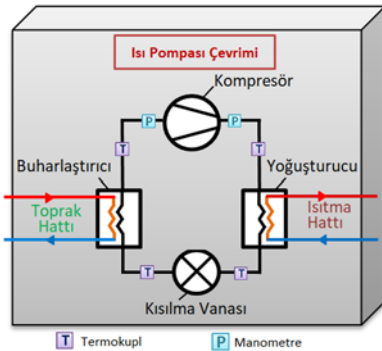
Çıkış	Giriş	Korelasyon	FDR
COP <sub>SYS</sub>	T9	0,806	1,64447e-146
COP <sub>SYS</sub>	T4	0,756	9,15245e-119
COP <sub>SYS</sub>	T6	0,752	5,71787e-117
COP <sub>SYS</sub>	T5	0,719	1,57025e-102
COP <sub>SYS</sub>	T1	0,703	5,96967e-96
COP <sub>SYS</sub>	T7	0,7	5,20033e-95
COP <sub>SYS</sub>	T2	0,427	1,15729e-29
COP <sub>SYS</sub>	T3	-0,227	7,19345e-09
COP <sub>SYS</sub>	T8	-0,162	3,69796e-05

**Çizelge 4.** Model 3 kullanılan girişlere ait Q<sub>y</sub> korelasyon matrisi

Çıkış	Giriş	Korelasyon	FDR
Q <sub>y</sub>	T9	0,855	1,78258e-182
Q <sub>y</sub>	T4	0,804	2,18336e-145
Q <sub>y</sub>	T6	0,803	5,42049e-145
Q <sub>y</sub>	T5	0,770	7,68406e-126
Q <sub>y</sub>	T1	0,752	2,90587e-117
Q <sub>y</sub>	T7	0,749	5,51014e-116
Q <sub>y</sub>	T2	0,467	8,09553e-36
Q <sub>y</sub>	T3	-0,210	9,09294e-08
Q <sub>y</sub>	T8	-0,191	1,19279e-06

### 2.3. Enerji Analizi

TKIP sisteminde kullanılan ısı pompasının şematik görünümü Şekil 4'te görülmektedir.



**Şekil 4.** Isı pompası çevrimin şematik gösterimi

Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısı ( $\dot{Q}_y$ ) Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{Q}_y = \dot{m}_{R410A} * (h_{y,g} - h_{y,\phi}) \quad (1)$$

$\dot{m}_{R410A}$  : IP devresinde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisi [kg/s],

$h_{y,g}$  : Yoğuşturucu girişinde soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg]

$h_{y,\phi}$  : Yoğuşturucu çıkışında soğutucu akışkanın entalpisi [kJ/kg]dir.

Isı pompasının performans katsayısı (COP<sub>IP</sub>) (Eşitlik 2):

$$COP_{IP} = \dot{Q}_y / \dot{W}_{komp} \quad (2)$$

Toplam tüketilen güç (Eşitlik 3) ve Sistemin performans katsayısı (COP<sub>SYS</sub>) Eşitlik 4'te verilmiştir.

$$\dot{W}_{top} = \dot{W}_{komp} + \dot{W}_{sp} \quad (3)$$

$$COP_{SYS} = \dot{Q}_y / \dot{W}_{top} \quad (4)$$

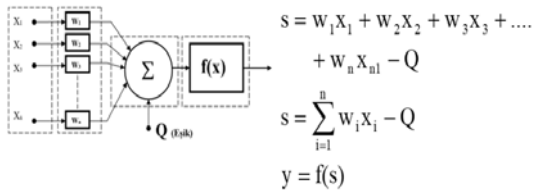
$\dot{W}_{komp}$  : Kompresörün tükettiği güç [kW]

$\dot{W}_{top}$  : Kompresör ve sirkülasyon pompalarının toplam güç tüketimi [kW]dir.

### 3. YSA METODOLOJİSİ

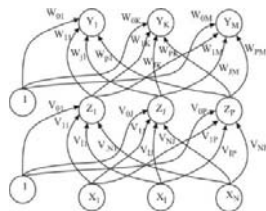
İnsan beyninin sinir ağı sisteminin matematiksel modeli araştırmacıların sürekli olarak dikkatini çekmiş ve yoğun çalışmalar sonucunda YSA olarak isimlendirilen yaklaşım geliştirilmiştir. YSA, özellikle son çeyrek yüzyılda en gündemde olan ve farklı disiplinlerdeki sayısız problem için, çözüm sunan bir yaklaşımdır. YSA ile ilgili en kısa ve öz tanımlama, bir öğrenme süreci yoluyla çevreden bilgi edinebilen ve bilgiyi bağlantılarında depolayabilen basit işlem birimlerinin büyük ölçüde paralel bir kombinasyonu olarak Haykin [27] tarafından yapılmıştır. Bilgi işleme yeteneğine sahip bir makine tarafından insana ait fikir yürütme, anlamlandırma, genelleştirme ve öğrenme gibi

mental faaliyetlerin yerine getirilme becerisinin temsili olarak kabul edilmiştir. Bahsi geçen modeli oluşturan en temel işlem elemanının (nöron) hesaplama mekanizması ile hala tam olarak anlaşılmayan insan beyninin nöro fiziksel temel işlem elemanının (nöron) davranışı modellenmeye çalışılmıştır. McCulloch ve Pitt [28] 1943 yılında hazırladıkları akademik bir yayında temel nöron tipinin ikili giriş için davranışını modelleyerek özelliklerini tanımlamışlardır. Temel bir YSA hücresinde, Şekil 5'te görüldüğü gibi giriş katmanı, ağırlık katmanı, toplama fonksiyonu katmanı, aktivasyon fonksiyonu katmanı ve çıkış katmanı bulunmaktadır. Girişler üzerinden elde edilen veri ağırlık değerleri vasıtasıyla nörona iletilmekte ve ağırlıkların etkisi ile girişin değerini belirlemektedir. Nöronda oluşan net değer, her bir giriş ve bu girişe ait ağırlıkların çarpımının toplamıdır. Aktivasyon fonksiyonuna uygulanan bu değer nöron çıkışını belirlemektedir. Genelde aktivasyon fonksiyonu türevlenebilir doğrusal olmayan bir fonksiyondur [29].



Şekil 5. Bir nöronun matematiksel yapısının açıklanması [29]

YSA, beyin hücrelerinin birbirlerine bağlanması ile oluşmuş paralel ve dağınık yapısını modellemek amacıyla oluşan bir sistem yaklaşımıdır ve yapay sinir hücrelerinin bu modeli taklit etmesi ile oluşur. Mimarisi farklı katmanlar ve bu farklı katmanlardaki işlem hücrelerin birbirleri ile bağlantısı Şekil 6'daki gibi düzenlenir ve donanım devreleri ile veya yazılımlar ile geliştirilebilir.



Şekil 6. İleri beslemeli YSA modeli (çok katmanlı)

Beynin bilgi işleme kabiliyetine benzer şekilde YSA, eğitim sürecinin peşinde gelen bir öğrenme aşamasını takiben veriyi toplama, hücreler arasında oluşan ağırlık değerleri ile bu veriyi saklama, genelleme üzerinde çalışılan probleme en uygun çıktıyı üretmek için YSA ağırlıklarının güncellenmesini yöneten öğrenme algoritmalarını içermektedir [30]. YSA'nın belirleyici gücü olan verilerden öğrenme kavramı, hedeflenen sonuç verilerini üretebilmek için diğer katmanlardaki nöronları bağlayan ağırlıklarının güncellenmesine dayanan öğrenme algoritmalarını kapsamaktadır. Geri yayılım algoritması, ileri beslemeli YSA'ları eğitmek için en çok tercih edilen algoritmadır [31]. Ağ ağırlıklarına göre kayıp fonksiyonunun gradyanını hesaplar ve her bir ayrı ağırlığa göre gradyanı doğrudan hesaplamaya nazaran daha verimlidir. Bu özellik, çok katmanlı ağların eğitilmesi ve üzerindeki kaybı en aza indirme aşamasında ağırlıkları yeniden düzenlemek için gradyan yöntemlerinin kullanılmasını sağlar; gradyan iniş veya stokastik gradyan iniş gibi değişkenler sıklıkla kullanılır. Geri yayılım algoritmasının amacı, ağıdaki herhangi bir w veya b önyargısına göre C maliyet fonksiyonunun kısmi türevlerini  $\partial C/\partial w$  ve  $\partial C/\partial b$  olarak hesaplamak için (Eşitlik 5) kullanılır.

$$C = \frac{1}{2n} \sum_x \|y(x) - a^L(x)\|^2 \quad (5)$$

Burada: n, eğitim örneklerinin toplam sayısıdır; toplam, bireysel eğitim örnekleri üzerindedir,  $x; y=y(x)$  karşılık gelen istenen çıktıdır. L, ağıdaki katman sayısını gösterir ve  $a^L=a^L(x)$ , x giriş olduğunda ağıdan çıkan aktivasyonların vektörüdür. Geri yayılım öğrenme algoritması, eğitim basamaklarını üç temel işlem üzerinden gerçekleştirir. Eğitim için kullanılan veri seti ağı ileri yönde verilir. Ağ çıkışında model tarafından üretilen hata değerleri hesaplanarak ağ üzerinde geri yönde yayılır ve son olarak bu işlemler sürecinde elde edilen hata oranı ile ağırlıklar güncellenir. Temel çok katmanlı geri yayılım ağı modelinde giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı bulunmaktadır. Bu aşamada gizli katman sayıları üzerinde teorik bir belirleme veya sınırlama mevcut değildir. Geri Yayılım Algoritması, sinir ağı modelinin danışmanlı öğrenme türüne giren genel



bir algoritmadır. Giriş katmanı ve çıkış katmanı arasında ki hata değeri hesaplanarak, ağırlıklar bu hata değerine göre yeniden hesaplayacak şekilde geliştirilmiştir. Şekil 6'daki  $Z_1$  ile gösterilen, ilk gizli katmandaki hücre için temel ağ işlem eşitliğini yazılırsa;

$$Z_{1-Giriş} = X_1V_{11} + \dots + X_I V_{I1} + \dots + X_N V_{N1} + V_{01} \quad (6-a)$$

$$Z_{J-Giriş} = V_{0J} + \sum_{I=1}^N X_I V_{IJ} \quad (6-b)$$

$$Z_{J-Çıkış} = f(Z_{J-Giriş}) \quad (6-c)$$

Eşitlik 6'da belirtildiği üzere, i. katman içerisindeki hücrelerin üreteceği çıktı değeri, bu katmana bağlı olan i-1. katmandaki hücrelerin girişleri ve ağırlıklı toplamların üzerine bu hücrenin aktivasyon fonksiyonunun etkisidir. Aynı eşitlikler ve yapılan hesaplamalar i+1. katman içinde geçerlidir. Bu eşitlikler üzerinden genel bir matematiksel model sunulacak olursa;

$$a_{0,j}^m = (\underline{x}_m)_j = x_j^m, \quad (7-a)$$

$$c_{i,j}^m = \sum_{k=1}^{s_{i-1}} w_{i,j,k} a_{i-1,k}^m + b_{i,j}, \dots \dots \dots i > 0 \quad (7-b)$$

$$a_{i,j}^m = F_{i,j}(c_{i,j}^m), \dots \dots \dots i > 0 \quad (7-c)$$

$$a_{i,j}^m = F_{i,j}(\sum_{k=1}^{s_{i-1}} w_{i,j,k} a_{i-1,k}^m + b_{i,j}) \quad (7-d)$$

$$a_{L,1}^m = y_m \quad (7-e)$$

$$\frac{1}{2} \|y_m - t_m\|^2 = \frac{1}{2} (y_m - t_m)^2 = e_m^2 = \varepsilon_m$$

Eşitlik 7' deki değer üretilecektir. Bu eşitlikler için, i-1. katmanı için hesaplanan sonuç değerleri i. katman için gerekli olan cevap (hesaplanan) değerlerini belirlemek için ileri yönde ağa verilecektir. Eğitim için kullanılan YSA algoritmalarının önemli bir çoğunluğu, ağa verilen eğitim veri setleri kullanılarak ağın çıkış

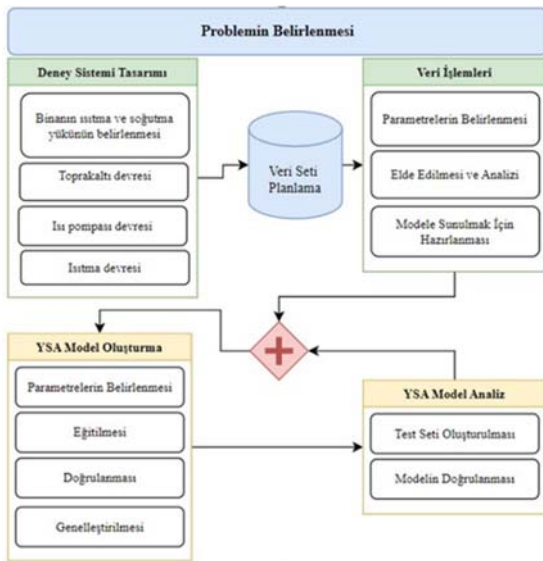
değerlerinin hedeflenen çıktılar ile uyumlu veya üretilen ağın hatasının en küçük oranlarda olmasını amaçlar. Eğimli iniş [32] olarak bilinen yöntem parametreleri ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 3.1. YSA Model Oluşturulması

YSA teorileri üzerinden geliştirilen sistemlerde modellerin mimarilerinin oluşturulması basamakları veya modelin sonuç başarısı üzerinde şüphesiz en etkili olan faktör eğitim için kullanılacak veri setinin oluşturulmasıdır [33]. Karmaşık veri analizi problemlerinin YSA ile çözüm basamakları Şekil 7'de gösterildiği gibi dört temel basamağı içermektedir. Sistem analizi açısından bakıldığında da verilen bu akışın başlangıç bölümü, problemin ve sınırlarının tanımlandığı, akış haritalarının belirlendiği ve kontrol olarak sürecinin oluşturulduğu basamaktır ve tüm modelin akışları üzerinde belirleyicidir. İkinci bölüm de yer alan veri seti hazırlığı, geliştirilen model veya sistem tarafından üretilen çıkış sonuçlarına cevap oluşturabilecek ve problemi en iyi şekilde temsil edebilecek veri setinin oluşturulmasıdır. YSA yaklaşımda modelin başarısı için en önemli parametre veri setinin doğası, yapısı ve problemi temsil etme yetisidir. YSA modelinin eğitici pozisyonunda olduğu için problem hakkında karar vericiler için net olarak belirleyicidir. Diğer aşama olan üçüncü basamakta yapısına karar verilmiş olan YSA modeli tekrarlı süreçlerde yaptığı hesaplamalar ile eğitilir. Son basamakta ise, kurulan YSA modelinin ürettiği çıktılar ile deneysel ölçüm değerleri ile veri madenciliği yapılarak karşılaştırılır ve modelin başarısı test edilir [34].

YSA ile veri analizleri yapılırken kısaca girdi verilerini belirli bir aralığa ölçeklendirme işlemi olan veri normalizasyonu yöntemleri kullanılabilir. Bu işlem verinin belirli bir aralıkta ve tutarlı bir şekilde temsil edilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. Yapay sinir ağları veri normalizasyonu, ağın daha hızlı, daha istikrarlı ve daha etkili bir şekilde öğrenmesine olanak tanır. Bu nedenle, genellikle ağların eğitimi öncesinde uygulanan önemli bir ön işleme adıdır. Fakat veri genel örüntüsünde temsil uzayında kaymalara sebep

olabilir. Bu yaklaşım ile kullanılan veri setinde, veri normalleştirme süreçleri tercih edilmemiş, çalışma verilerinin ölçüldüğü hali ile gerçekleştirilmiştir. YSA modelinin üreteceği çıktıların beklenen değerleri açıklayacak şekilde oluşturulmasıyla başlayan süreci destekleyecek olan kabul edilebilir sonuçlar üretecek veri analizi için yüksek kaliteli veriler hazırlamaktır.



Şekil 7. YSA veri analiz basamakları

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

YSA modellerinde, modelin eğitildiği veri setinin örüntü yapısını en iyi şekilde temsil etmesi modele ait parametrelerin giriş verilerinin model üzerindeki etkilerini yansıtacak şekilde seçilmesi gereklidir. Bu sebeple en iyi çıktı sonuçları üretecek model için parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak sürekli eğitimler gerçekleştirilmiştir. Eğitilen modelin çıktılarını test etmek için istatistiksel değer ölçü birimlerinin ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE), hataların karelerinin ortalamasının karekökü (Root Mean Squared Error, RMSE), ortalama mutlak hata yüzdesi (Mean Absolute Percentage Error MAPE), çoklu belirleme katsayısı (R Squared, R<sup>2</sup>) [35] ürettiği değerler arasında temsil gücü en iyi olan parametre kombinasyonu Çizelge 5'te verilmiştir. YSA modelini eğitime başlamadan önce veri seti ve

daha sonra geliştirilen model yapısının tutarlılığını kontrol edebilmek amacı ile başlangıçta "Model Test Veri Seti" olarak tüm veri setinin %15'i gelişigüzel olarak seçilen verilerden belirlenmiş ve ayrılmıştır. Geri kalan %85'i ise önerilecek modelin geliştirilmesi için "Model Eğitim Seti" olarak kullanılmıştır. Model test veri seti modelin kurulması veya eğitilmesi esnasında hiçbir şekilde modele sunulmamıştır. Bu set modelin eğitiminden sonra performans değerleri üzerindeki kontroller ile modelin başarısının denemesi amacı ile kullanılmıştır. Verilerin temel ayırım süreci sonrası, YSA modellerinin eğitilmesinde kullanılmak üzere "Model eğitim seti; %80", %10 "Test" ve %10 "Doğrulama" setleri olarak tekrar gelişigüzel olarak ayrılarak YSA modelinin eğitimi için hazırlanan koda sunulmuştur. Üzerinde çalışılan YSA modelleri bu setleri kullanarak iterasyonlar ile kabul edilebilir başarıya ulaşılan kadar denenmiştir.

Çizelge 5. İterasyonlar sonucunda belirlenen YSA parametreleri

1. Modelin Mimarisi	[20 30 10 5]
2. Modelin Mimarisi	[20 30 30 10 5]
3. Modelin Mimarisi	[20 40 20 10]
Öğrenme Algoritması	Levenberg-Marquardt
Öğrenme Oranı	0.1
Momentum	0.9
Performans fonksiyonu	Mean Square Error
Veri Seti Ayırma Yöntemi	Divide data randomly

Geliştirilen YSA modellerinin genel performansını değerlendirmek ve aşırı uyum gibi sorunları tespit etmek için kullanılan çapraz doğrulama uygulanmıştır. Veri seti farklı alt kümelerine bölünerek modelin eğitildiği ve test edildiği bir yöntemdir. Bu yöntem ile modelin genelleme yeteneğinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlanır. K-fold çapraz doğrulama, veriyi rastgele k alt kümeye böler ve her aşamada bir alt küme test, diğerleri eğitim olarak kullanılır. Bu işlem tekrarlanarak modelin genel performansı değerlendirilir. Çapraz doğrulama, tek bir eğitim-test bölünmesine bağlı olarak model performansının değişebileceği durumları azaltarak

daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu çalışmada veri seti bu yöntem ile ayrılarak eğitimler gerçekleştirilmiş ve en iyi sonucu veren veri doğrulamasına ait çıktıları üreten veri ayrımları kullanılmıştır. Çalışmanın bu noktasından ileride bu yöntem ile belirlenen en iyi istatistiksel değer çıktıların üreten veriler kullanılmıştır. Çizelge 6’da türetilen veri setlerini sonuçları örneklenmiştir.

**Çizelge 6.** Çapraz doğrulama veri ayırım sonuçları

Model	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	MAPE
Model1	0,8694	0,0266	0,0148	0,7132
	0,9057	0,0252	0,0154	0,7491
	0,94606	0,01621	0,01172	0,00557
Model2	0,97740	0,00870	0,00646	0,00361
	0,91092	0,02038	0,01493	0,81223
	0,95699	0,01179	0,01467	0,69633
Model3	0,9537	0,0543	0,0355	0,0058
	0,93658	0,059902	0,035131	0,58644
	0,94603	0,060514	0,041078	0,68743

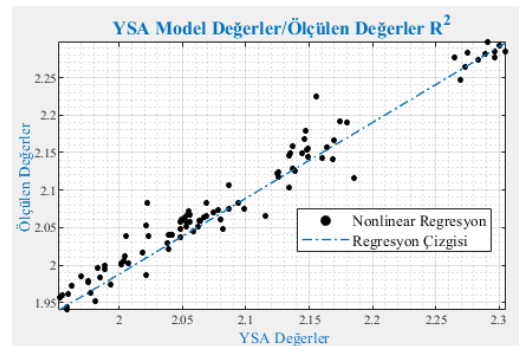
Eğitimler sonucunda Çizelge 5 ile verilen parametreler belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile eğitilen modellerin başarısı, YSA modeli için kullanılan eğitim veri setinden başlangıçta rasgele bir şekilde ayrılan ve YSA modellerinin eğitim sürecinde hiç kullanılmayan, dışarıda tutulan %15’ lik oranla ayrılan Model Test Veri Seti üzerinde denenmiş ve sonuçlar istatistik metrikler üzerinden karşılaştırılmıştır. Çünkü bu veri setine ait değerler, modelin eğitimi ve geliştirilmesi süreçlerinden modelin hiçbir aşamasında kullanılmamıştır. YSA’nın aşırı öğrenme veya ezberleme gibi istenmeyen yapılar da eğitilme sonucunun da testini göstermektedir. Sonuçta karar verilen YSA modeline sunulan bu veri seti için üretilen R<sup>2</sup> değerleri temel alınarak model seçimi yapılmıştır. Burada test veri seti, doğrulama veri seti ve model test veri seti sıralaması kullanılarak YSA modeli tarafından üretilen çıktıların istatistiksel değer ölçüleri sıralanmış ve en uygun model seçilmiştir ve çizelgeler ile sunulmuştur.

İlk veri grubu için yapılan eğitim, test, doğrulama(Doğ.) ve model test deneme sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir. Isı pompasının deneysel değerlerini kullanarak YSA yöntemiyle modellenmesi yapılmıştır ve modelin tutarlılığını ve başarısını kontrol edebilmek amacı ile başlangıçta ayrılan “Model Test Veri Seti” geliştirilen YSA modeline sunulmuş, ürettiği istatistiksel değerler listelenmiştir. Modelin performansını belirleyen değerler R<sup>2</sup>, RMSE, MAPE ve MAE’dir. Sistemi en iyi şekilde temsil eden modelin belirlenmesinde “Model Test Veri Seri” kullanılarak en iyi değerleri üreten modelin seçildiği bir kere daha vurgulanmalıdır. Diğer veri seti değerleri, eğitim esnasında kullanıldıkları için, YSA’nın eğitimi süreçlerinde yüksek değerler üretmesi beklenen bir durumdur. Fakat belirlenen modelin hiç görmediği bir veri seti ile yüksek sonuçlar üretmesi modelin en iyi testidir. Önceden de belirtildiği gibi, modelin ezberleme ve aşırı öğrenmeye karşı testlerinin de incelenmesini sağlar.

**Çizelge 7.** Isı pompası istatistiksel değerleri

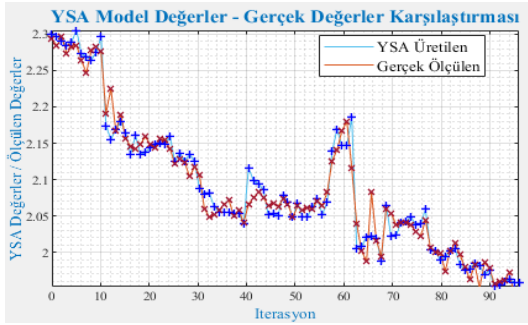
	Eğitim	Test	Doğ.	Model Test
<b>MAPE</b>	0,00470	0,00446	0,00569	0,00557
<b>MAE</b>	0,00987	0,00937	0,01197	0,01172
<b>RMSE</b>	0,01414	0,01327	0,01813	0,01621
<b>R<sup>2</sup></b>	0,96808	0,97230	0,95199	0,94606

Diğer taraftan, ısı pompası COP değerlerinin deneysel ve YSA yöntemiyle tahmin edilen sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 8’de verilmiştir. Grafiğe göre deneysel değer ile model tarafından oluşturulan değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



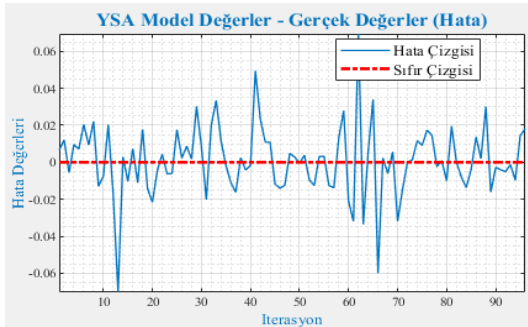
**Şekil 8.** Isı pompasının regresyon grafiği

Isı pompası COP değerlerinin deneysel ve YSA yöntemiyle tahmin edilen sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 9'da verilmiştir. Deneysel değerler ve YSA yöntemiyle bulunan sonuçlar kıyaslandığında iki değer arasındaki en büyük fark ve en küçük farkın yakın olduğu görülmüştür. Bulunan sonuçlar modelin iyi çalıştığını göstermektedir.



Şekil 9. Isı pompasının COP'lerinin deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması

YSA modeli ve gerçek değerler arasındaki fark Şekil 10'da hata değer grafiğinde gösterilmiştir. Isı pompasının YSA modellemesi sonucu  $R^2$  değerinin 0,94606 olduğu görülmektedir. Şekilde değerlerin birbirine yakınlığı hesaplamaların hassasiyetinin doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 10. Deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen ısı pompası COP değerlerinin hata karşılaştırması

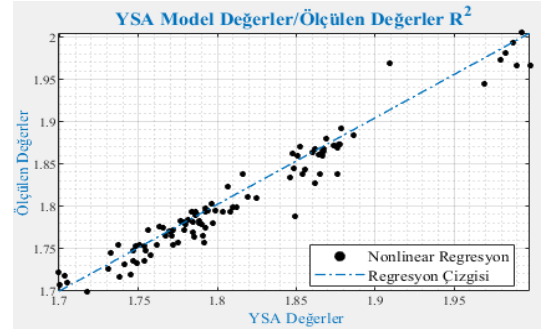
Çizelge 8'de TKIP sisteminin YSA modellemesi ile eğitilen modele başlangıçta ayrılan %15' lik test verileri sunulurken elde edilen istatistiksel değerleri görülmektedir. Modelin doğruluğunun ispatı için

odaklanan değerler "Model Test" kısmında istatistiksel belirleyiciler olarak sunulmuştur.

Şekil 11'de deneysel değerler ile YSA tarafından üretilen değerlerin regresyon grafiği sunulmuştur. Şekilde verilen regresyon grafiğinde noktaların doğruya yakın olarak dağılım göstermeleri oluşturulan modelin istatistiksel olarak başarılı olduğunu göstermektedir. Model Test Veri Seti kullanılarak üretilen değerler ile grafikler çizilmektedir.

Çizelge 8. TKIP sisteminin istatistiksel değerleri

	Eğitim	Test	Doğ.	Model Test
MAPE	0,00272	0,00227	0,00543	0,00361
MAE	0,00493	0,00414	0,00977	0,00646
RMSE	0,00760	0,00602	0,01457	0,00870
$R^2$	0,98786	0,99257	0,95732	0,97740



Şekil 11. TKIP sisteminin regresyon grafiği

Şekil 12'de ise sistemin COP'lerinin deneysel ve YSA modeli tarafından tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. TKIP sisteminin YSA modellemesi sonucu  $R^2$  değerinin 0,97740 olduğu görülmektedir. Şekilde değerlerin birbirine yakınlığı hesaplamaların hassasiyetinin doğruluğunu göstermektedir.

TKIP Sisteminin COP'lerinin YSA modeli ve gerçek değerleri arasındaki fark Şekil 13'de hata değer grafiğinde gösterilmiştir.

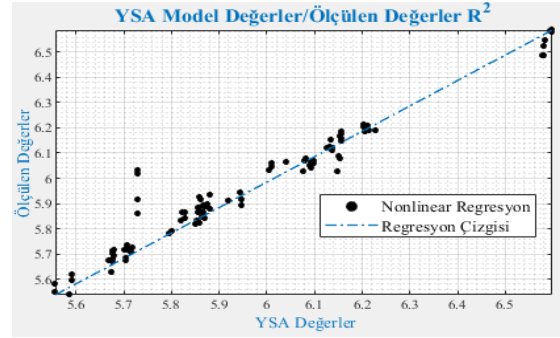
Deneysel çalışma neticesinde elde edilen verilerle modellenmiş yoğunlaştırıcuda ısıtma suyuna aktarılan ısının YSA istatistiksel değerleri Çizelge 9'da sunulmuştur.

Şekil 14’de yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının deneysel değerleri ile YSA modeli tarafından üretilen değerlerinin regresyon grafiği görülmektedir.

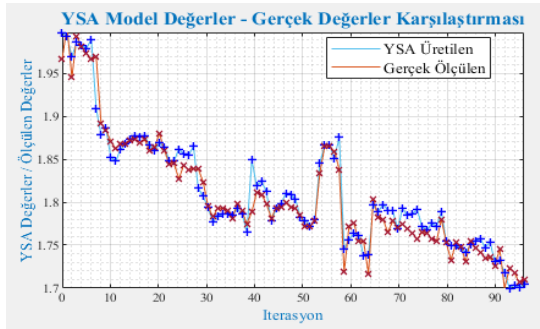
Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin arasındaki fark Şekil 16’da hata değer grafiğinde gösterilmiştir.

**Çizelge 9.** Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının istatistiksel değerleri

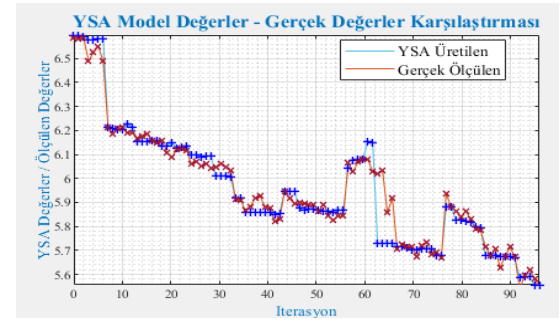
	Eğitim	Test	Doğ.	Model Test
<b>MAPE</b>	0,0029	0,0025	0,0036	0,0058
<b>MAE</b>	0,0177	0,0149	0,0222	0,0355
<b>RMSE</b>	0,0287	0,0229	0,0333	0,0543
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9874	0,9918	0,9851	0,9537



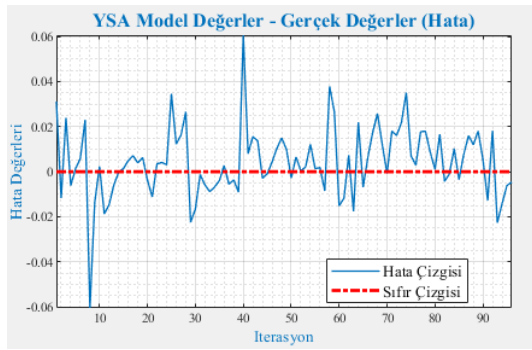
**Şekil 14.** Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının regresyon grafiği



**Şekil 12.** TKIP Sisteminin COP'lerini deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması

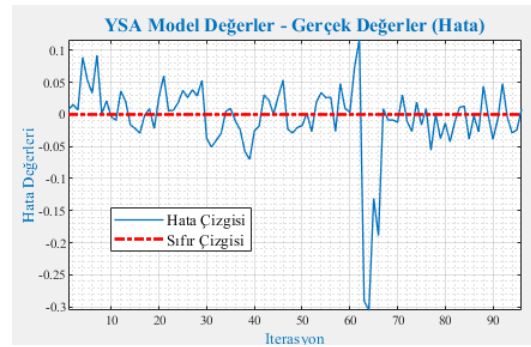


**Şekil 15.** Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması



**Şekil 13.** TKIP Sisteminin COP'lerinin deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin hata karşılaştırılması

Şekil 15’te deneysel ve YSA modeli tarafından tahmin edilen değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının YSA modellemesi sonucu R<sup>2</sup> değerinin 0,9537 olduğu görülmektedir.



**Şekil 16.** Yoğuşturucuda ısıtma suyuna aktarılan ısının deneysel ve YSA tarafından tahmin edilen değerlerinin arasındaki hatanın karşılaştırılması

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek enerji talebi nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtların yerini alacak yeni bir kaynak olarak önemli hale gelmektedir. Isıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılamak için sürdürülebilir ve yenilikçi enerji kaynakları olan ısı pompaları, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabilen, fosil yakıtların kullanımını önleyebilen ve enerji tasarruflu sistemlerdir. Yapay sinir ağları farklı uygulamalarda yaygın olarak incelenen sistemlerin davranışlarını simüle etmek ve çözümlerini optimize etmek için bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ısı pompasının ve TKIP sisteminin COP değerlerini ve yoğunlaştırıcuda ısıtma suyuna aktarılan ısıyı tahmin etmek için deneysel parametrelere dayanan bir YSA modeli oluşturulmuştur. Her bir model için hedeflenen çıktıyı üretecek şekilde modellenen YSA' lara ait R<sup>2</sup> değerleri incelenmiş ve özellikle Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10' daki grafik dağılımları üzerinden durularak elde edilen sonuçların üretilen modellerin problemi temsil ettiği, örüntüyü kabul edilebilir oranlarda ifade ettiği söylenebilmektedir. Bu çalışmanın sonucunda, ısı pompası COP R<sup>2</sup> değeri 0,94606, TKIP sistemi COP R<sup>2</sup> değeri 0,9774 ve yoğunlaştırıcudan atılan ısının YSA modelinin R<sup>2</sup> değeri 0,9537 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler modelin R<sup>2</sup> değerinin 1 değerine yaklaşan yüksek öngörülebilirliğe sahip olabileceğini göstermiş ve modelin kullanılabilirliğinin hassasiyetini ortaya koymuştur. Bu model ile Sivas ili ve benzer özellikteki yerleşim yerleri için yüksek maliyete sahip sistemin kurulum yapılmadan performans yaklaşımı yapılabileceği tespitinde bulunulmuştur. Gerek ortam ısıtması gerekse tarım sektöründe sera ısıtılmasında kullanımı uygun olan TKIP sisteminin kurulumu yapılmadan performans analizleri yapılabilecek ve böylelikle zaman ve maliyet açısından kazanım sağlanabilecektir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M., 2010. Advances in Heat Pump Systems: A Review, Applied Energy, 87(12), 3611-3624.
2. Xu, X., Liu, J., Wang, Y., Xu, J., Bao, J., 2020. Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump Using Linear and Nonlinear Regressions and Artificial Neural Networks. Applied Thermal Engineering, 180, 115914.
3. Yeşilbaş, D., Güven, A., 2021. Kütle Spektrometresi Verileri Kullanılarak Yumurtalık Kanserinin Yapay Sinir Ağlarıyla Sınıflandırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(3), 781-790.
4. Ozbek, A., 2016. Yapay Sinir Ağları Kullanarak Nemli Havanın Termodinamik Özelliklerinin Tahmini. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 51-58.
5. Şevik, S., Aktaş, M., Özdemir, M.B., Doğan, H., 2014. Bir Güneş Destekli Isı Pompalı Kurutucuda Mantarın Kurutma Davranışlarının Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Modellenmesi. Journal of Agricultural Sciences, 20(2), 187-202.
6. Toktaş, İ., Aktürk, N., 2011. Yapay Sinir Ağları Tabanlı Silindirik Düz Dişli Çark Tasarımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(3), 387-395.
7. Mellit, A., Kalogirou, S.A., Hontoria, L., Shaari, S., 2009. Artificial Intelligence Techniques for Sizing Photovoltaic Systems: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 406-419.
8. Kalogirou, S.A., 2001. Artificial Neural Networks in Renewable Energy Systems Applications: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 5, 373-401.
9. Mohanraj, M., Jayaraj, S., Muraleedharan, C., 2012. Applications of Artificial Neural Networks for Refrigeration Air-conditioning and Heat Pump Systems: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1340-1358.
10. Esen, H., Inalli, M., Esen, M., Pihtili, K., 2007. Energy and Exergy Analysis of a Ground-Coupled Heat Pump System with Two Horizontal Ground Heat Exchangers, Building and Environment, 42(10), 3606-3615.
11. Balbay, A., Esen, M., 2013. Temperature Distributions in Pavement and Bridge Slabs Heated by Using Vertical Ground-Source Heat Pump Systems. Acta Scientiarum. Technology, 35(4), 677-685.

12. Marmaras, J., Burbank, J., Kosanovic, D.B., 2016. Primary-Secondary De-Coupled Ground Source Heat Pump Systems Coefficient of Performance Optimization Through Entering Water Temperature Control. *Applied Thermal Engineering*, 96, 107-116.
13. Zheng, T., Shao, H., Schelenz, S., Hein, P., Vienken, T., Pang, Z., Nagel, T., 2016. Efficiency and Economic Analysis of Utilizing Latent Heat from Groundwater Freezing in the Context of Borehole Heat Exchanger Coupled Ground Source Heat Pump Systems. *Applied Thermal Engineering*, 105, 314-326.
14. Arcaklıoğlu, E., Erisen, A., Yilmaz, R., 2004. Artificial Neural Network Analysis of Heat Pumps Using Refrigerant Mixtures. *Energy Conversion Management*, 45(11-12), 1917-1929.
15. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., Esen, M., 2008. Performance Prediction of a Ground-Coupled Heat Pump System Using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 35(4), 1940-1948.
16. Esen, H., Inalli, M., 2009. Modelling of a Vertical Ground Coupled Heat Pump System by Using Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 36(7), 10229-10238.
17. Esen, H., Inalli, M., Sengur, A., Esen, M., 2008. Forecasting of a Ground-Coupled Heat Pump Performance Using Neural Networks with Statistical Data Weighting Pre-Processing. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(4), 431-441.
18. Mohanraj, M., Jayaraj, S., Muraleedharan, C., 2009. Performance Prediction of a Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump Using Artificial Neural Networks. *Applied Energy*, 86(9), 1442-1449.
19. Wang, G., Zhang, Y., Wang, R., Han, G., 2013. Performance Prediction of Ground-Coupled Heat Pump System Using NNCA-RBF Neural Networks. In 2013 25th Control and Decision Conference (CCDC), Chinese, 2164-2169.
20. Benli, H., 2016. Performance Prediction Between Horizontal and Vertical Source Heat Pump Systems for Greenhouse Heating with the Use of Artificial Neural Networks. *Heat and Mass Transfer*, 52(8), 1707-1724.
21. Sun, W., Hu, P., Lei, F., Zhu, N., Jiang, Z., 2015. Case Study of Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump System Based on ANN and ANFIS Models. *Applied Thermal Engineering*, 87, 586-594.
22. Park, S.K., Moon, H.J., Min, K.C., Hwang, C., Kim, S., 2018. Application of a Multiple Linear Regression and an Artificial Neural Network Model for the Heating Performance Analysis and Hourly Prediction of a Large-Scale Ground Source Heat Pump System. *Energy and Buildings*, 165, 206-215.
23. Puttige, A.R., Andersson, S., Östin, R., Olofsson, T., 2021. Application of Regression and ANN Models for Heat Pumps with Field Measurements. *Energies*, 14(6), 1750.
24. Shin, J., Cho, Y., 2021. Machine-Learning Based Coefficient of Performance Prediction Model for Heat Pump Systems. *Applied Sciences*, 12(1), 362.
25. Liu, Y., Mei, X., Zhang, G., Cao, Z., 2023. Long-term Performance Prediction of Ground Source Heat Pump System Based on Co-simulation and Artificial Neural Network. *Journal of Building Engineering*, 79, 107949.
26. Caner, M., 2018. Yatay Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Sivas Şartlarında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas, Türkiye, 111.
27. Kubat, M., 1999. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* by Simon Haykin, Macmillan, 1994, ISBN 0-02-352781-7. *The Knowledge Engineering Review*, 13(4), 409-412, 823.
28. Fitch, F.B., 1944. McCulloch Warren S. and Pitts Walter, *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
29. Fausett, L.V., 1994. *Fundamentals of Neural Networks Architectures Algorithms and Applications*, Englewood Cliffs. NJ: Prentice-Hall, 476.
30. Gurney, K., 1997. *An Introduction to Neural Networks*. UCL Press SBN 0-203-45151-1, 317.
31. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., 1986. *Learning Representations by Back-*

- propagating Errors. *Nature*, 323(6088), 533-536.
32. Graupe, D., 2007, Principles of Artificial Neural Networks. World Scientific, 6, 303.
  33. Ruder, S., 2016. An Overview of Gradient Descent Optimization Algorithms. arXiv preprint arXiv:1609.04747.
  34. Hu. X., 2003. DB-HReduction: A Data Preprocessing Algorithm for Data Mining Applications. *Applied Mathematics Letters*, 16(6), 889-895.
  35. González-Sopeña, J.M., Pakrashi, V., Ghosh, B., 2021. An Overview of Performance Evaluation Metrics for Short-term Statistical Wind Power Forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110515.



## A Case Study of Nelder Mead Simplex Optimization Algorithm: Trade-Offs of Sprienski Fractal Bowtie Antenna Parameters

Duygu Nazan GENÇOĞLAN\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5014-9514

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering,  
Department of Electrical-Electronics Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 26.10.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: GENÇOĞLAN, D.N., (2024). A Case Study of Nelder Mead Simplex Optimization Algorithm: Trade-Offs of Sprienski Fractal Bowtie Antenna Parameters. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 73-84.

### Abstract

In this study, tri-band antenna design adapted for wireless communication, Internet of Things (IoT) and RFID systems is examined. The simulation results indicate that the proposed antenna has three distinct frequency bands. Band 1 (lower band) covers the frequency range of 1.64-1.78 GHz with a resonance frequency of 1.7 GHz. Band 2 covers the range of 3.06-3.9 GHz with a resonance frequency of 3.4 GHz with a high gain of 10 dBi and a radiation efficiency of 92% for long-range communication. Band 3 radiates from 6.25 to 7.6 GHz with a resonance frequency of 6.62 GHz, which is suitable for higher-frequency applications. The antenna design is simulated and analyzed regarding S11, VSWR, gain, radiation efficiency, and bandwidth. Especially, Band 2 (mid-band) provides notable performance, with its 10 dBi gain and 92% efficiency, which makes the proposed antenna an ideal structure for high-data-rate, long-distance communication systems, and 5G (midband) applications. This study also employs the Nelder-Mead Simplex algorithm to observe the optimization of the physical parameters of the proposed antenna via multiple objective functions. The optimization results outlines that longer the arm length of the proposed antenna causes to decrease the resonance frequency of Band 3. Addition to this, the gain is higher with the lower arm length except for the arm length of 90.467 mm and flare angle of 64.77°. That's, the trade-off condition occurs between minimum return loss and gain. At this point, it can be concluded from this optimization algorithm results that each objective function should be evaluated separately due to this trade-off condition.

**Keywords:** Antenna, Algorithm, Fractal, High gain, Optimization, Sprienski

### Nelder Mead Simpleks Optimizasyon Algoritması Üzerine Bir Durum Çalışması: Sprienski Fraktal Bowtie Anten Parametrelerinin Ödünleşimleri

### Öz

Bu çalışmada, kablosuz iletişim, nesnelerin interneti ve RFID sistemleri için uyarlanmış üç bantlı anten tasarımı incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen antenin üç farklı frekans bandına sahip olduğunu göstermektedir. Bant 1 (alt bant), 1.7 GHz rezonans frekansı ile 1.64-1.78 GHz frekans aralığını kapsar.

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Duygu Nazan GENÇOĞLAN, [dngencoglan@atu.edu.tr](mailto:dngencoglan@atu.edu.tr)

Bant 2, 3.06 GHz'ten başlayan 3.9 GHz de sonlanan çalışma bant aralığına sahiptir. Ayrıca, bant-2 için en yüksek kazanç değeri 10 dBi ve radyasyon verimliliği 92% olarak tespit edilmiştir. Bant 3, daha yüksek frekanslı uygulamalar için uygun olan 6.62 GHz rezonans frekansı ile 6.25 -7.6 GHz arasında yayılır. Anten tasarımı, S11, VSWR, kazanç, radyasyon verimliliği ve bant genişliği açısından simüle edilmiş ve analiz edilmiştir. Özellikle, Bant 2 (orta bant), 10 dBi kazancı ve %92 verimliliği ile kayda değer bir performans sağlar, bu da önerilen anteni yüksek veri hızı, uzun mesafeli iletişim sistemleri ve 5G (orta bant) uygulamaları için ideal bir yapı haline getirmektedir. Bu çalışma da aynı zamanda, önerilen antenin fiziksel parametrelerinin optimizasyonunu çoklu objektif fonksiyonlar aracılığıyla gözlemlemek için Nelder-Mead Simplex algoritmasını kullanılmıştır. Optimizasyon sonuçları, önerilen antenin kol uzunluğunun artması Bant 3'ün rezonans frekansının azalmasına neden olduğunu özetlemektedir. Buna ek olarak, kol uzunluğu küçüldükçe kazanç artmaktadır. Ancak 90.467 mm'lik kol uzunluğuna ve 64.77°'lik açığa sahip olan antende bu özelliğin tersi durum olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada, bu optimizasyon algoritması sonuçlarından, bu ödünleşim koşulu nedeniyle her bir amaç fonksiyonunun ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Anten, Algoritma, Fraktal, Yüksek Kazanç, Optimizasyon, Sprinski

## 1. INTRODUCTION

Multiband antennas in the context of wireless technology have led researchers to explore unconventional geometries [1,2]. The fractal geometry allows for the generation of multiple resonant frequencies within a compact antenna size, enabling wideband operation [3]. The use of fractal structures also facilitates the achievement of stable radiation patterns [4]. Additionally, fractal antennas have advantages such as compact size, multiband frequency characteristics, and high gain [5-7]. The other structures are also acceptable for various applications including terahertz detection [8], bandwidth enhancement [4], wireless applications [5], X-band and Ku-band applications [6], ultra-wideband applications [7], UWB imaging applications [9], broadband applications [10], multiband applications [11], and directivity improvement [12]. As of the literature survey, fractal antennas can be considered as the fractal butterfly antenna [3], square-shaped fractal antenna [4] wideband high gain fractal antenna [5], multiband high-gain slotted fractal antenna [6], hexagonal fractal ultra-wideband antenna [7], compact high gain UWB antenna using fractal geometry [8], microstrip line-fed fractal antenna with a high fidelity factor [9], Minkowski Island and Crossbar fractal microstrip antennas [10], Sierpinski carpet fractal antenna [11], cross-stitch geometry-based multiband fractal antenna [12], ultra-wideband antenna using Minkowski-like

fractal geometry [13], and ultra-wideband fractal microstrip antenna [14]. These proposed antenna structures are extensively studied for their ability to achieve high gain in the literature as well. Furthermore, these fractal antennas utilize self-similarity and recursive geometrical patterns to increase the effective electrical length of the antenna, which results in increased gain. To sum up, fractals with their inherent characteristic provide a new technique for the antenna designers. First, the size modification of each triangle makes the antenna resonate various frequencies. That's, these frequencies enable the proposed antenna structure to radiate over a broader range of bands. Secondly, the entangled geometry boosts the electromagnetic energy to increase the signal strength. As a third, fractal antennas can be designed with smaller size as compared to the traditional antennas, which provides the size reduction. But these positive features occur with their own several trade-offs. The tangled geometry of the antenna causes to predict the antenna performance in difficult. This is where algorithms come into play to solve these challenges.

One of the iterative optimization algorithms called Nelder-Mead Simplex employs a myriad of simplex (the points) to identify the design space and the parameters [15-17]. It is a direct search method used for optimization problems, particularly in low-dimensional spaces [18]. The algorithm has been proven to converge under certain conditions [18]. However, it can suffer from stagnation and

convergence issues in higher-dimensional complex problems [19]. Researchers have proposed modifications and adaptations of the Nelder-Mead algorithm to improve its performance. For instance, adaptive parameters are depicted to enhance the efficiency of the algorithm [20]. Dynamic variables of the algorithm including Dynamic Hassan Nelder Mead with Simplex Free Selectivity, are developed for unconstrained optimization problems [21]. The Nelder-Mead algorithm is also interconnected with other optimization techniques to obtain hybrid algorithms. For example, an amalgamation of the Nelder-Mead simplex method and the Cuckoo search algorithm has been suggested for training Fuzzy neural networks [22]. Addition to this, Nelder-Mead algorithm is integrated into genetic algorithms and particle swarm optimization for various applications including medical image registration and parameter detection [23,24]. This mentioned algorithm plays also paramount role in electromagnetic and microwave applications including antenna design and optimization. Mistry et al. has presented a study on simulation, measurement and optimization in the time and frequency domain in the logarithmic domain of periodic antennas [25]. The Nelder-Mead simplex algorithm is used to optimize the performance of log-periodic antennas, which are generally preferred for electromagnetic compatibility measurements, spectrum monitoring and television reception [25]. Mahmoud presents the optimization of conventional bowtie antenna structure for 2.45 GHz RFID readers via hybrid algorithms of Bacterial Swarm Optimization (BSO) and Nelder-Mead (NM) [26]. In [26], the objective function is determined as S11 according to the physical parameters including half height (h), feeding neck width(d), and flare angle ( $\alpha$ ). Barman et al. has investigated the probe location optimization of wideband microstrip patch antenna with particle swarm optimization (PSO), genetic algorithm (GA), and NM, respectively [27]. The objective function has been determined as VSWR and Gain parameters in [27]. Montaser et al. depicts the S11 optimization of the slotted bowtie antenna by focusing on the arm length and flare length [28]. Then, hybrid algorithms are evaluated the pros and cons of the proposed algorithm namely PSO, GA, and NM as well [28]. Liu et al. proposes a hybrid optimization

method for pattern synthesis of large antenna arrays [29]. The authors combine the Nelder-Mead Simplex Algorithm with other optimization techniques to overcome the challenges in antenna array design [29]. In summary, the Nelder-Mead Simplex Algorithm has been widely applied in antenna design and optimization. It offers advantages such as adaptability to the local landscape, effective exploration of the design space, and the ability to improve antenna characteristics such as gain, bandwidth, and radiation pattern. However, as of knowledge obtained from literature survey, there is no study related with the optimization of sprienski bowtie antenna parameters with Nelder Mead Simplex Algorithm. Hence, in this study, the physical parameters of sprienski bowtie antenna structure are optimized with multiple objective functions through Nelder Mead Simplex Algorithm.

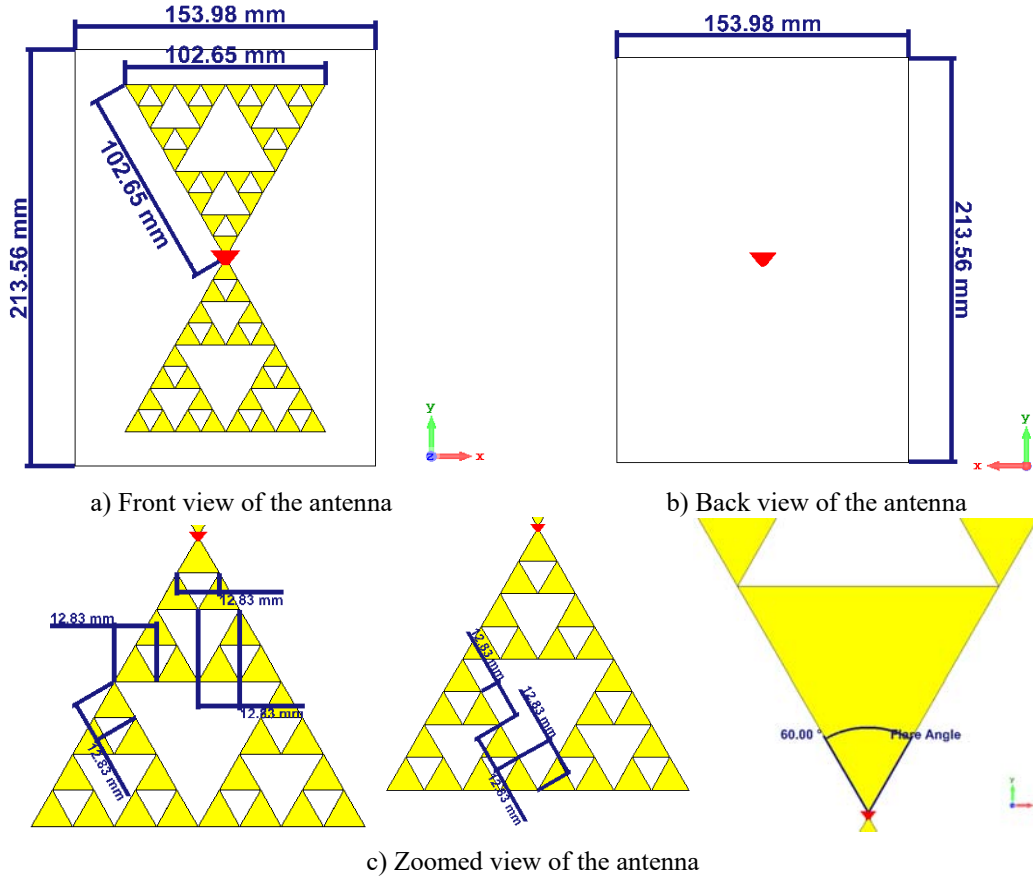
The structure of the paper can be summarized as follows: Section II describes in detail the methodology of the proposed design, including modelling and optimization procedures. The influence of different antenna parameters on performance is explained in the third section. Section III highlights the comparison between other existing antenna structures in the literature as well as the results of the antenna performance parameters. Section V concludes the article.

## 2. MODELLING AND OPTIMIZATION OF THE ANTENNA

The proposed sprienski bowtie antenna is a challenging and versatile antenna structure since its bandwidth characteristic. Hence, the modelling and numerical analysis of the proposed structure evaluated via CST Microwave Studio. The proposed antenna structure consists of radiating patches and substrate material characterized as low-cost FR-4 with the thickness of 1.6 mm and the dielectric constant of 4.3. The overall dimension of the designed antenna is calculated as 153.98x213.56 mm<sup>2</sup> as detailed in Figure 1a. As seen from Figure 1b, the back of the substrate material does not cover the ground plane, which is special feature of the bowtie structures. The

antenna's radiating arms are made up of triangular elements based on fractalization technique. Each side of the smaller triangular initially is calculated

as 12.83 mm depicted in Figure 1c. The flare angle of the proposed antenna is taken as 60° represented in Figure 1c as well.



**Figure 1.** The geometry of the proposed antenna structure with dimensions

In this study, hybrid objective functions are defined as Return Loss ( $S_{11} < -10$  dB), Voltage Standing Wave Ratio ( $VSWR < 2$ ), and Impedance ( $Z = 50\Omega$ ), which quantify the performance of the antenna. The physical design variables are considered as arm length, feed gap, flare angle, and relative permittivity to optimize the antenna's performance. The initial set of design variables are given in Section 2.1. These antenna structure form the first simplex in the parameter space. Then, objective function values are calculated for each instance. In other words, this requires simulating the antenna performance parameters for each set of design

variables by using values in Table 1. Up to maximum number of iterations, this process convergence threshold, or other criteria. The best value is found after the termination of the algorithm represents the optimal set of design variables for the antenna, as it corresponds to the minimum (or maximum) of the objective function. After obtaining the optimized design variables, they are implemented in the antenna design and simulate the antenna's performance. Then, the results are analyzed to verify the improvements achieved through the optimization process.

**Table 1.** The parametrized design variables of the proposed antenna structure

Parameter	Min	Max	Mean	Std. Dev	# of distinct
Arm Length (mm)	80.64	95.9	89	0.52	279
Feed Gap (mm)	0.2	0.22	0.21	0.001	107
Flare Angle (mm)	53.3	66	62.7	0.43	231
Relative Permittivity	4.3	11.54	8.89	0.28	430

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

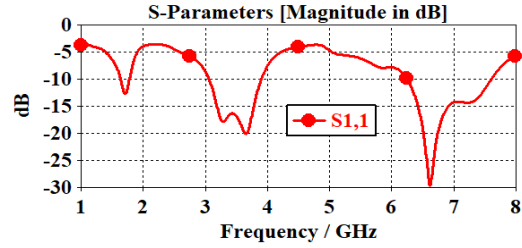
#### 3.1. Initial Simulated Antenna Performance Parameter Results of the Proposed Antenna

The simulated reflection coefficient characteristic of the proposed antenna is depicted in Figure 2. It is clear from Figure 2 that the proposed antenna structure has triple band characteristics in the frequency range of interest. The desired frequency range is selected from 1 GHz to 8 GHz referred to as the microwave frequency range. It is significant in various fields due to its fundamental characteristics and applications. This frequency range is important why there are some reasons which cover Wireless Communication, Radar Systems, Satellite Communication, Aerospace and Defense, ISM Applications, Remote sensing & Earth observations, short range communication, Sensing, Radio Astronomy etc.

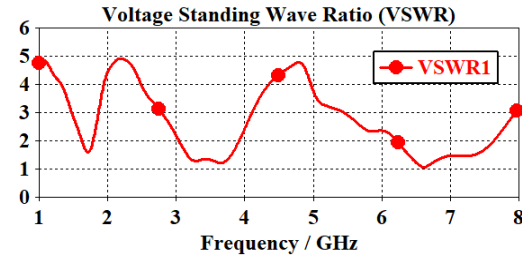
As seen from Figure 2, three distinct operating frequencies include as 1.635-1.7779 GHz (Band 1), 3.0596-3.8989 GHz (Band 2), and 6.25- 7.6 GHz (Band 3), respectively. Their corresponding resonance frequencies are 1.7 GHz, 3.4 GHz, and 6.62 GHz. The proposed antenna with its specified bands and characteristics can be used in various applications due to its multiband capabilities.

VSWR characteristic of the proposed antenna structure is also outlined in Figure 3. It is also depicted from Figure 3 that the proposed antenna has triple-band characteristics within the 1 GHz to

8 GHz frequency range. As seen from Figure 3, VSWR close to 1 at each resonance frequency of the proposed antenna structure. VSWR characteristic of the proposed antenna indicates good impedance matching at the resonance frequencies and is desirable for the efficient power transfer.



**Figure 2.** The reflection coefficient characteristic of the proposed antenna structure in the desired frequency



**Figure 3.** The VSWR characteristic of the proposed antenna structure in the desired frequency

Another crucial antenna performance parameter is of gain to understand the antenna's characteristics and its potential applications. The detailed gain characteristic is given in Figure 4. The gain of 5.8 dBi (at 1.7 GHz) suggests that the antenna has relatively moderate gain in this band, which can be suitable for many wireless communication applications. The gain of 10 dBi (at 3.4 GHz) suggests a higher level of gain, making it suitable for applications requiring increased directional performance. The gain of 6.67 dBi (at 6.62 GHz) suggests moderate gain, making it suitable for applications that require a balance between directivity and wide coverage.

Radiation efficiency and radiation pattern characteristics of the proposed antenna is illustrated in Figure 5 and Figure 6, respectively.

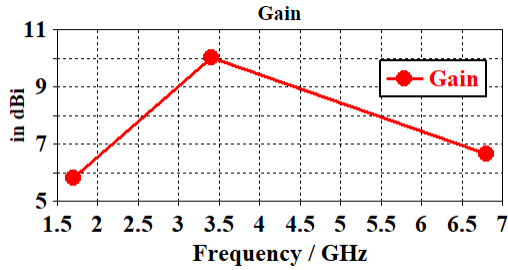


Figure 4. The gain characteristic of the proposed antenna structure in the desired frequency

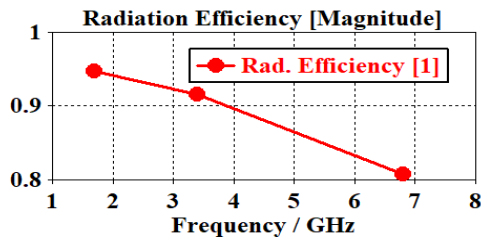
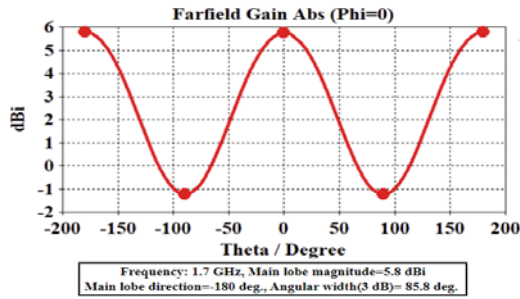
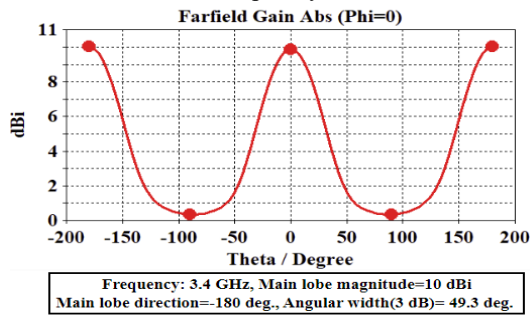


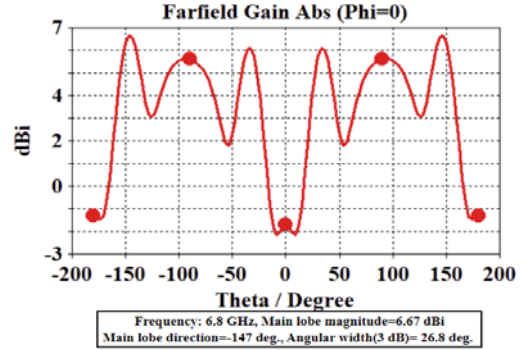
Figure 5. The radiation efficiency characteristic of the proposed antenna structure in the desired frequency



a) The radiation pattern characteristic for the resonance frequency of 1.7 GHz



b) The radiation pattern characteristic for the resonance frequency of 3.4 GHz



c) The radiation pattern characteristic for the resonance frequency of 6.8 GHz

Figure 6. The radiation pattern characteristic of the proposed antenna structure

Table 2 is outlined overall RF performance parameters of the proposed antenna structure. Band 1 exhibits excellent antenna efficiency (95%), indicating that a high percentage of the input power is effectively radiated as electromagnetic waves. High efficiency is desirable for minimizing power loss and ensuring effective signal transmission and reception. Band 2 provides substantial antenna gain (10 dBi), suggesting that it can direct and concentrate radiation in specific directions. High gain is essential for long-range communication and radar applications where signal strength and coverage are critical. Band 3 covers a relatively broad frequency range, making it versatile for applications that require flexibility in frequency selection. The proposed antenna in Band 3 provides a balance between gain and efficiency, making it suitable for applications that require both directional performance and power efficiency.

Table 2. RF performance parameters of the proposed antenna structure

Band	Op. Freq. (GHz)	Res. Freq. (GHz)	Gain (dBi)	Efficiency (%)
1	1.64-1.78	1.7	5.8	95
2	3.06-3.9	3.4	10	92
3	6.25-7.6	6.62	6.67	81

In summary, the proposed antenna exhibits different characteristics and performance levels in each band, allowing it to cater to a wide range of applications:

- **Band 1 (1.635-1.7779 GHz):** High efficiency, suitable for efficient power transfer and reliable communication, such as satellite and wireless applications.
- **Band 2 (3.0596-3.8989 GHz):** High gain and good efficiency, ideal for radar, long-range communication, and aerospace applications.
- **Band 3 (6.25-7.6 GHz):** Versatile frequency range, balanced gain and efficiency, making it adaptable for various applications, including satellite communication and wireless LANs.

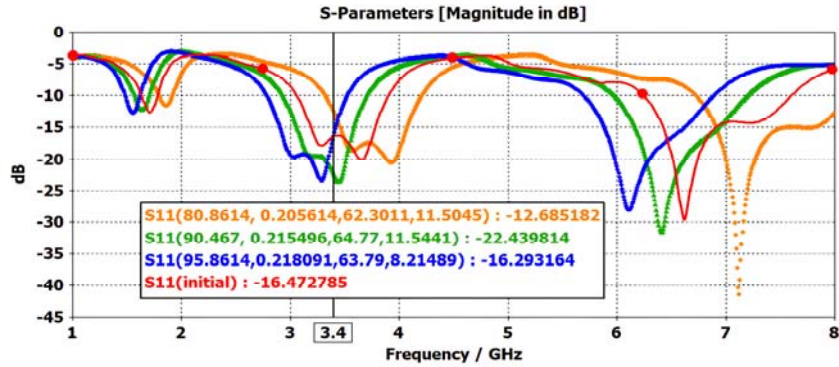
### 3.2. Optimized Simulated Antenna Performance Parameter Results of the Proposed Antenna

The minimum, maximum, mean, std deviation and how many different values each design parameter to be optimized are given in Table 1. This dataset shows the values obtained because of the Nelder-Mead Simplex algorithm. By increasing the arm length of the proposed antenna, the resonance frequency of Band 3 is decreased as represented in Figure 7a. However, the gain is higher with the lower arm length of the proposed antenna except for the arm length of 90.467 mm and flare angle of 64.77° as depicted in Figure 7b. On the other hand, the trade-off condition occurs between minimum return loss and gain as depicted in Figure 7c and 7d, respectively. At this point, it is deduced from this optimization algorithm results that each objective function should be evaluated separately due to this trade-off condition.

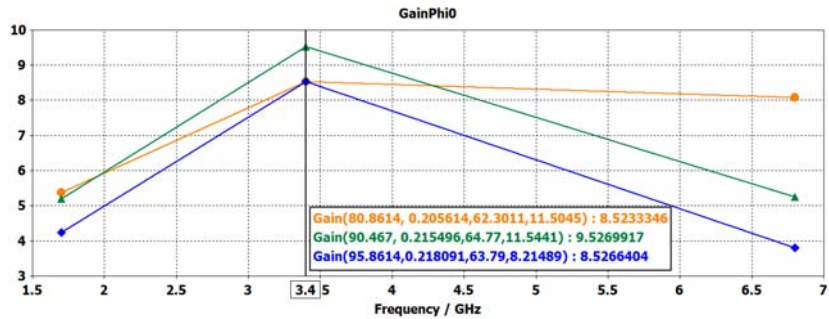
The highlighted study, represented by "this work" in Table 3 stands out in the table due to several key

characteristics that contribute to the existing literature on antenna design and performance [30-41]. With a gain of 10 dBi, the antenna design in this study exhibits high signal amplification capabilities, which is crucial for many applications, particularly in long-range and high-data-rate communication systems. The proposed antenna offers a relatively wide bandwidth of approximately 840 MHz. A broad bandwidth is essential for accommodating a range of communication frequencies within a single design, making it versatile for various applications. A radiation efficiency of 92% is a significant achievement. High radiation efficiency indicates that most of the input power is effectively converted into radiated electromagnetic waves, minimizing losses. This is especially important in real-world applications where efficiency is a primary concern.

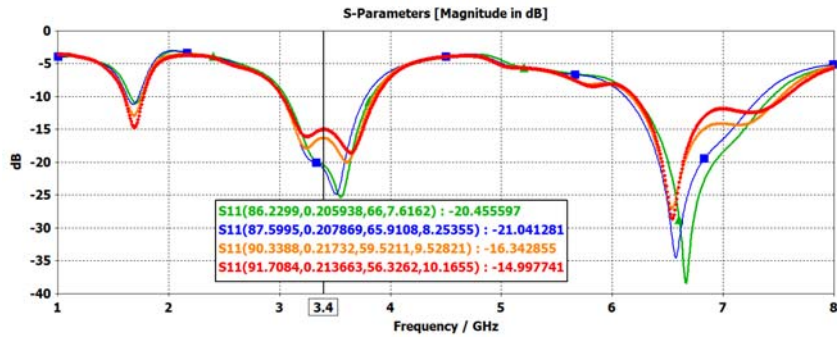
The antenna's substantial size (213.56x153.98 mm<sup>3</sup>) may suggest that it could be suitable for long-range communication or applications where a more extensive coverage area is required. While Reference [31] has a higher gain (5.5 dBi), it has a narrower bandwidth (approximately 700 MHz) compared to the highlighted study. This study offers a much broader frequency coverage. In [33] and this study have almost similar bandwidth, but this study has a significantly higher gain (10 dBi). This suggests it may be more suitable for long-range or high-gain applications. In [38], which uses PTFE as the substrate, has a similar bandwidth to the highlighted study, but it offers a lower gain of 5.1 dBi. In contrast, the highlighted study achieves a remarkable 10 dBi gain. In summary, this study stands out in the table due to its impressive gain, high radiation efficiency, and broad bandwidth, making it a valuable contribution to the literature on antenna design. It appears to excel in terms of gain and efficiency compared to several other entries in the table, making it a notable design for various communication and signal reception applications.



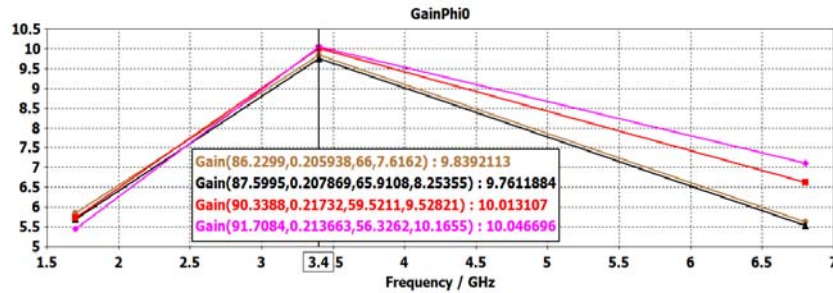
a) Corresponding S11 parameters obtained by Nelder-Mead Simplex Algorithm



b) Corresponding Gain parameters obtained by Nelder-Mead Simplex Algorithm



c) Corresponding S11 parameters obtained by Nelder-Mead Simplex Algorithm



d) Corresponding Gain parameters obtained by Nelder-Mead Simplex Algorithm

**Figure 7.** Some evaluated antenna design parameters by changing the physical dimensions via Nelder-Mead Simplex



#### 4. CONCLUSION

In this study, a sprienski antenna design with exceptional performance characteristics is presented, particularly its ability to operate across a wide frequency range of 1 GHz to 8 GHz. This antenna structure exhibits a triple-band response, making it a versatile solution for various applications within the microwave frequency range, which is renowned for its paramount significance in a multitude of fields. The importance of the microwave frequency range is highlighted by its fundamental properties and its various applications. It plays a critical role in enabling key technologies

such as wireless communications, radar systems, satellite communications, aerospace and defense, industrial, scientific and medical (ISM) applications, remote sensing, short-range communications, detection and radio astronomy. The importance of this frequency range cannot be underestimated as it underpins essential aspects of modern technology and scientific research. The proposed antenna design has triple band characteristics, called as Band 1 (1.635-1.7779 GHz), Band 2 (3.0596-3.8989 GHz) and Band 3 (6.25-7.6 GHz). Each resonance frequency is of 1.7GHz, 3.4GHz and 6.62GHz, respectively.

**Table 3.** Comparison of the antenna performance parameters with the other antenna structure in the literature

Ref	Substrate	Dimension (mm×mm)	Band Feature	Operating Frequency	Gain	Radiation Efficiency	Bandwidth
30	FR-4	9.4x14.2	Triple	3.4-3.6 GHz	~2 dBi	~0.4%	200 MHz
31	FR-4	30x17	Triple	3.4-4.1 GHz	5.5 dBi	96%	~700 MHz
32	FR-4	33x17	Triple	3.3-3.7 GHz	2.23 dB	~80%	400 MHz
33	FR-4	60x50	Triple	3.42-3.6 GHz	5.18 dB	68%	180 MHz
34	FR-4	40x40	Triple	3.3-3.7 GHz	>1.96dBi	83%	400 MHz
35	FR-4	27.5x20	Triple	3.35-3.90 GHz	4 dBi	<90%	550 MHz
36	FR-4	85x56	Triple	3.41-3.6 GHz	3.87 dBi	Not mentioned (NM)	190MHz
37	FR-4	32.4x27.9	Single	3.4-3.59 GHz	4.16 dB	~82%	190 MHz
38	PTFE	20x20	Dual	3.15-3.485 GHz	5.1 dB	NM	170 MHz
39	FR-4	29.8x36	Single	3.4-3.6 GHz	2.55 dB	71%	200 MHz
40	FR-4	28x26.8	Dual	3.12-3.58 GHz	2.72 dB	NM	460 MHz
41	FR-4	88x88	Single	1.9-3.7 GHz	7 dB	NM	1.8 GHz
This work	FR-4	213.56x153.98	Triple	3.06-3.9 GHz	10 dBi	92%	~840 MHz

The characteristic of VSWR shows good impedance matching at the desired resonance frequencies. It is also deduced from VSWR analysis that the proposed antenna has promising value to provide the power transmission efficiency. Antenna gain values vary from 5.8 dBi to 10 dBi, reflecting a balance between coverage, directivity and efficiency. This versatility makes the proposed antenna alternative for a variety of applications including satellite communications, radar systems, wireless communications, remote sensing and more. In addition, the Nelder-Mead simplex algorithm, which is a kind of mathematical

optimization technique, is used to systematically examine and tune the antenna physical design parameters. It is highlighted from optimization method that the effect of arm length on resonance frequency and gain, as well as the balance between return loss and gain. This trade-off condition requires careful evaluation of each individual parameter to achieve the desired antenna performance. It is also necessary to evaluate each objective function (e.g., resonance frequency, gain, return loss) separately. This is due to the observed trade-off condition where optimization of one parameter may occur at the expense of another.

Therefore, a compromise or balance must be found, and each parameter evaluated individually to ensure that the antenna achieves its performance goals for a particular application. Further studies can be carried out to optimize the design of the proposed antenna structure considering factors such as size, sensitivity and radiation efficiency. The performance of the antenna can be evaluated in various environments and scenarios to evaluate its suitability for various applications. The proposed antenna can be tested and validated in real-world scenarios to evaluate its practicality and effectiveness.

## 5. REFERENCES

1. Li, D., Mao, J., 2014. Coplanar Waveguide-Fed Koch-Like Sided Sierpinski Hexagonal Carpet Multifractal Monopole Antenna. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(5), 358-366.
2. Ramalakshmi, G., Rao, P.M., 2019. Performance Characteristics of Modified Sierpinski Fractal Antenna for Multiband Applications. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(2), 2194-2200.
3. Shi, Y., Zhang, X., Qiu, Q., Gao, Y., Huang, Z., 2021. Design of Terahertz Detection Antenna with Fractal Butterfly Structure. *IEEE Access*, 9, 113823-113831.
4. Mishra, P., Pattnaik, S., Dhaliwal, B., 2017. Square-Shaped Fractal Antenna Under Metamaterial Loaded Condition for Bandwidth Enhancement. *Progress in Electromagnetics Research C*, 78, 183-192.
5. Desai, A., Upadhyaya, T., Patel, R., Bhatt, S., Mankodi, A., 2018. Wideband High Gain Fractal Antenna for Wireless Applications. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 74, 125-130.
6. Dahiya, A., Anand, R., Sindhwani, N., Kumar, D., 2021. A Novel Multi-Band High-Gain Slotted Fractal Antenna Using Various Substrates for X-Band and Ku-Band Applications. *Mapan*, 37(1), 175-183.
7. Tripathi, S., Mohan, A., Yadav, S., 2014. Ultra-Wideband Antenna Using Minkowski-Like Fractal Geometry. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(10), 2273-2279.
8. Dwivedi, R., Kommuri, U., 2018. Compact High Gain UWB Antenna Using Fractal Geometry and UWB-AMC. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(3), 787-793.
9. Islam, M., Islam, M., Samsuzzaman, M., Faruque, M., Misran, N., 2015. Microstrip Line-Fed Fractal Antenna with a High-Fidelity Factor for UWB Imaging Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(11), 2580-2585.
10. Kubacki, R., Czyżewski, M., Laskowski, D., 2018. Minkowski Island and Crossbar Fractal Microstrip Antennas for Broadband Applications. *Applied Sciences*, 8(3), 334.
11. Mohanamurali, R., Shanmuganatham, T., 2012. Sierpinski Carpet Fractal Antenna for Multiband Applications. *International Journal of Computer Applications*, 39(14), 19-23.
12. Tripathi, S., Mohan, A., Yadav, S., 2014. Hexagonal Fractal Ultra-Wideband Antenna Using Koch Geometry with Bandwidth Enhancement. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 8(15), 1445-1450.
13. Dhaliwal, B., Pattnaik, S., Boparai, J., 2014. A Cross-Stitch Geometry-Based Multiband Fractal Antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(3), 667-671.
14. Azari, A., Rowhani, J., 2008. Ultra-Wideband Fractal Microstrip Antenna Design. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2, 7-12.
15. McKinnon, K.I., 1998. Convergence of the Nelder-Mead Simplex Method to A Nonstationary Point. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), 148-158.
16. Barton, R.R., Ivey Jr, J.S., 1996. Nelder-Mead Simplex Modifications for Simulation Optimization. *Management Science*, 42(7), 954-973.
17. Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*, 7, 308-313.
18. Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., Wright, P.E., 1998. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), 112-147.

19. Mohsin, A., Alsmadi, Y.M., Uppal, A.A., Gulfam, S.M., 2021. A Modified Simplex Based Direct Search Optimization Algorithm for Adaptive Transversal FIR Filters. *Science Progress*, 104(2), 1-19.
20. Gao, F., Han, L., 2010. Implementing the Nelder-Mead Simplex Algorithm with Adaptive Parameters. *Computational Optimization and Applications*, 51(1), 259-277.
21. Musaffer, H., Mahmood, A., 2018. Dynamic Hassan Nelder Mead with Simplex Free Selectivity for Unconstrained Optimization. *IEEE Access*, 6, 39015-39026.
22. Chang, J., Liao, S., Wu, S., Lin, C., 2015. A Hybrid of Cuckoo Search and Simplex Method for Fuzzy Neural Network Training. 2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control, 13-16.
23. Li, Q.W.X., 2011. Application of Improved Genetic Algorithm in Practical Medical Image Registration. *International Journal of Digital Content Technology and Its Applications*, 5(10), 60-67.
24. Xu, S., Zou, X., Liu, W., Wang, X., Zhu, H., Zhao, T., 2010. Research of Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Nelder-Mead Simplex and Its Application on Partial Discharge Parameter Recognition. 2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, 719-722.
25. Mistry, K.K., Lazaridis, P.I., Zaharis, Z.D., Akinsolu, M.O., Liu, B., Xenos, T.D., Prasad, R., 2019. Time and Frequency Domain Simulation, Measurement and Optimization of Log-Periodic Antennas. *Wireless Personal Communications*, 107, 771-783.
26. Mahmoud, K., 2010. Design Optimization of a Bow-Tie Antenna for 2.45 GHz RFID Readers Using A Hybrid BSO-NM Algorithm. *Progress in Electromagnetics Research*, 100, 105-117.
27. Barman, B., Chatterjee, D., Caruso, A.N., 2021. Probe-Location Optimization in A Wideband Microstrip Patch Antenna Using Genetic Algorithm, Particle Swarm and Nelder-Mead Optimization Methods. In 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), 1-3.
28. Montaser, A.M., Mahmoud, K.R., Elmikati, H.A., 2011. Slotted Bow-Tie Antenna Design for RFID Readers Using Hybrid Optimization Techniques. In 2011 28th National Radio Science Conference (NRSC), 1-8.
29. Liu, J., Zhao, Z., Yang, K., Liu, Q.H., 2014. A Hybrid Optimization for Pattern Synthesis of Large Antenna Arrays. *Progress in Electromagnetics Research*, 145, 81-91.
30. Rao, L.Y., Tsai, C.J., 2018, August. 8-Loop Antenna Array in the 5 Inches Size Smartphone for 5G Communication the 3.4 GHz-3.6 GHz Band MIMO Operation. In 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 1995-1999.
31. Kumar, L., Nath, V., Reddy, B.V.R., 2023. Triple-Band Stub Loaded Patch Antenna with High Gain for 5G Sub-6 GHz, WLAN and WIMAX Applications Using DGS. *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, 36(2), 171-188.
32. Karthikeyan, M., Sitharthan, R., Ali, T., Pathan, S., Anguera, J., Shanmuga Sundar, D., 2022. Stacked T-Shaped Strips Compact Antenna for WLAN and WIMAX Applications. *Wireless Personal Communications*, 1-14.
33. Elkorany, A.S., Mousa, A.N., Ahmad, S., Saleeb, D.A., Ghaffar, A., Soruri, M., Limiti, E., 2022. Implementation of A Miniaturized Planar Tri-Band Microstrip Patch Antenna for Wireless Sensors in Mobile Applications. *Sensors*, 22(2), 667.
34. Patel, U., Parekh, M., Desai, A., Upadhyaya, T., 2021. Wide Slot Tri-Band Antenna for Wireless Local Area Network/World-Wide Interoperability for Microwave Access Applications. *International Journal of Communication Systems*, 34(12), 1-10.
35. Ahmad, H., Zaman, W., Bashir, S., Rahman, M., 2020. Compact Triband Slotted Printed Monopole Antenna for WLAN and WIMAX Applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(1), 1-8.
36. Pandya, A., Upadhyaya, T. K., Pandya, K., 2021. Tri-Band Defected Ground Plane Based Planar Monopole Antenna for Wi-

- Fi/WIMAX/WLAN Applications. Progress in Electromagnetics Research C, 108, 127-136.
37. Chowdhury, M.Z.B., Islam, M.T., Rmili, H., Hossain, I., Mahmud, M.Z., Samsuzzaman, M., 2022. A Low-Profile Rectangular Slot Antenna for Sub-6 GHz 5G Wireless Applications. International Journal of Communication Systems, 35(17), 1-14.
  38. Sajith, K., Jose, J., Sweety, T.J., Arun, T.R., Raj, R.K., 2022. SRR Inspired Multi-Layered Antenna for ISM and 5G Medical Applications. In 2022 8th International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC), 196-199.
  39. Gnanathickam, J., Thanusha, G., Moses, N., 2023. Design and Development of Microstrip Patch Antenna for 5G Application. In 2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 1-4.
  40. Mushtaq, M.T., Shah, S.M.A., Munir, S., Hussain, M., Iqbal, J., Khan, U.H., 2022. Dual Band Microstrip Semicircular Slot Patch Antenna for WLAN and WIMAX Applications. Radioengineering, 31(3), 407.
  41. Wang, E., Liu, X., Chang, H., 2023. Wideband Circular Polarized Fractal Antenna for RFID/WiMAX/WLAN Applications. Progress in Electromagnetics Research Letters, 111, 111-120.

## Examining the Effects of a Flood Event in the Lower Ceyhan Basin in 1980 Using Historical Satellite Data

Şerife Pınar GÜVEL\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-3175-5938

Mehmet Ali AKGÜL<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-5517-9576

Recep YURTAL<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-3175-6567

<sup>1</sup>General Directorate of State Hydraulic Works, 6th Regional Directorate, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 19.07.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/How to cite: GÜVEL, Ş.P., AKGÜL, M.A., YURTAL, R., (2024). Examining the Effects of a Flood Event in the Lower Ceyhan Basin in 1980 Using Historical Satellite Data. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 85-93.

### Abstract

Analysis of past flood events contributes forecasting of effects of future flood events. Flood maps have been created in order to assess flood hazards in planning projects and to identify flood-inundated regions with flood damage following flood occurrences. Flood mapping in the context of flood monitoring enables development of flood management strategies to protect life and property. Although conventional terrestrial observations and measurements in flood control have been constrained by topographical and meteorological circumstances, remote sensing provides decision support with quick analysis capability. The flood event that occurred in the Lower Ceyhan Basin of Turkey in 1980 was examined in this work utilizing satellite-based remote sensing techniques, and flood inundation areas were calculated using NDWI (Normalized Difference Water Index). As a result, it was determined that 3493.45 ha in the north of Karataş in the Lower Ceyhan Plain, 7799.42 ha between Bahçe, Akdeniz, and Yumurtalık, 7404.9 ha around Çatalpınar and Yakapınar in the Lower Ceyhan Plain, and approximately 24890 ha in the Upper Ceyhan were affected by the flood event in 1980.

**Keywords:** Ceyhan River floods, Historical satellite data, Landsat-3, NDWI

### 1980 Yılında Aşağı Ceyhan Havzasında Gerçekleşen Taşkın Olayının Tarihsel Uydu Verisi Kullanılarak İncelenmesi

#### Öz

Geçmişteki taşkın olaylarının analizi, gelecekteki taşkın etkilerinin tahmin edilmesine yardımcı olur. Taşkın haritaları, taşkın tehlikelerini planlama sürecinde değerlendirmek ve taşkın sonrası hasarı olan bölgeleri belirlemek için hazırlanmaktadır. Taşkın haritalarının yapılması, taşkınların izlenmesi kapsamında, can ve malları korumak için taşkın yönetim stratejilerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Taşkın kontrol çalışmalarında, geleneksel karasal ölçümler ve gözlemler, topografik ve meteorolojik

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Şerife Pınar GÜVEL, [spinar.guvel@dsi.gov.tr](mailto:spinar.guvel@dsi.gov.tr)

koşullar tarafından sınırlandırılmış olsa da, uzaktan algılama tekniği, hızlı analiz yeteneği ile karar desteği sağlamaktadır. Bu çalışmada 1980 yılında Türkiye'nin Aşağı Ceyhan Havzasında meydana gelen taşkın olayı uydu tabanlı uzaktan algılama teknikleri kullanılarak incelenmiş ve NDWI (Normalize Edilmiş Su İndeksi) kullanılarak taşkın alanları hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Aşağı Ceyhan Ovası'nda, Karataş kuzeyinde 3493,45 ha, Bahçe, Akdeniz ve Yumurtalık arasında 7799,42 ha, Çatalpınar ve Yakapınar çevresinde 7404,9 ha ve Yukarı Ceyhan Ovası'nda yaklaşık 24890 ha alanın 1980 yılındaki Aşağı Ceyhan Havzasında gerçekleşen taşkın olayından etkilendiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ceyhan Nehri taşkınları, Tarihsel uydu verisi, Landsat-3, NDWI

## 1. INTRODUCTION

Floods are natural catastrophes that occur often in many areas across the world and have disastrous impacts on people, nature, society, and the economy. Over many years, structural and non-structural solutions have been implemented to avoid loss of life and property and to mitigate the harmful consequences of flood disasters. Historical records, observations, studies, publications, and images of previous flood occurrences give knowledge on flood-affected places; hence, flood risk assessments are supported by the use of these materials in future flood management activities. In this context, investigating previous flood incidents will help to forecast future flood management techniques. Historical floods have been investigated in many previous studies [1-14].

One advantage of employing remote sensing techniques to detect flood spreading regions is that it provides data from flood extent locations that are physically difficult or impossible to access. The GIS strategy, as an effective tool for data storage, analysis, and administration, supports decision-making while also saving time and cost. In comparison to previous years, tremendous progress has been achieved in flood risk assessments, flood monitoring operations, flood mapping, and flood damage assessment utilizing remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS).

Many studies and articles on the use of RS and/or GIS methods in flood mapping have been published in the literature [15-28]. Knowing the geographical extent of submerged regions during flood occurrences is crucial for organizing relief studies as well as detecting faults with flood control facilities [29]. Because of the ability to acquire data

in uncharted areas, remote sensing data has become an alternative to in-person observations as technology advances [29]. It was expressed by Dash and Sar (2020) that spatial mapping of historical floods using spaceborne data are getting popularity based on the advancements in sensors and repetitive coverage [30].

Flooding occurred in agricultural regions and some villages in the plain as a result of the flood event that occurred in the Seyhan and Ceyhan rivers in the Çukurova Plain in 1980. According to the official flood report issued by State Hydraulic Works, the 1980 flood event in Lower Ceyhan Plain caused damage in four neighborhoods and 26 villages in Ceyhan, nine villages in Kadirli, thirteen villages in Kozan, one neighborhood in Osmaniye, and one village in Yumurtalık [31].

In this study, maps of flood-inundated regions from the 1980 flood event in the Lower Ceyhan plain were created for the first time using satellite-based remote sensing data. The purpose of this research is to assess the value of using past satellite data in the creation of flood control plans for future projects in order to assist decision-makers. In this study, it is also evaluated if flood control infrastructure or devices require restoration or redesign.

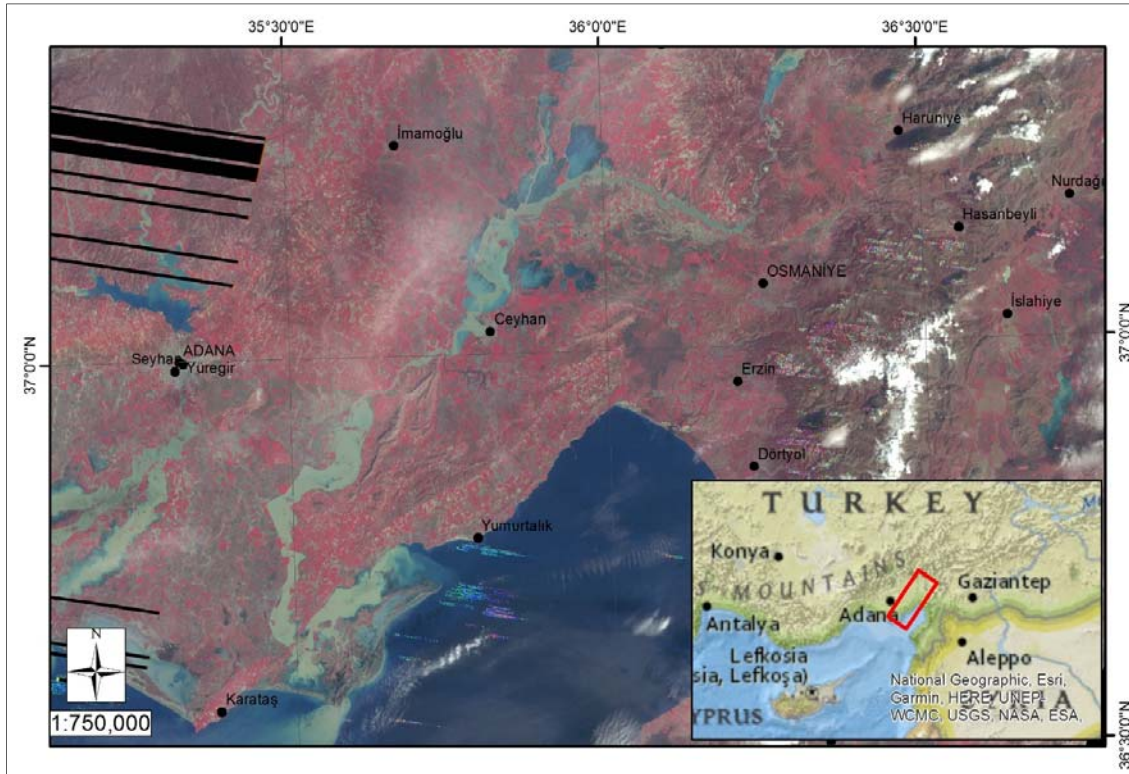
## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Material

The study area was chosen to be the Lower Ceyhan Plain, which was flooded in 1980. The study area is in Turkey's southern Mediterranean Region, with the Ceyhan River as its major water supply. Figure 1 depicts flood-inundated regions in the Lower Ceyhan Basin on April 1, 1980, as well as their

location in Turkey. The development of projects in the Lower Ceyhan Basin and the basin development process were thoroughly reviewed in an IECO study issued in 1966. The Seyhan basin lies west and north of the Lower Ceyhan basin, the Middle Ceyhan basin lies east, and a coastal basin runs south along the Iskenderun Bay. The key agricultural plains in the research region, Kirmit,

Kozan, and Kadirli, are on the right coast, Misis, Ceyhan, Köşreli, and Osmaniye are on the left coast, and Andırın and Haruniye are on the east. Furthermore, although being outside the drainage region, the water resources in the Lower Ceyhan basin have a significant impact on the Yumurtalık and Erzin-Dört Yol-Payas plains, which are part of the development process [32].



**Figure 1.** The flood inundated areas in Lower Ceyhan Basin on 1 April 1980 (Landsat 3 image of the study area)

Apart from the irrigation and energy production functions of the Ceyhan Aslantaş Dam, it was reported that one of the goal of the project was to protect 53,270 hectares of land from floods using this dam [32]. In the report prepared by IECO (1966), it was stated that the floods in the Lower Ceyhan basin generally occur in winter and spring, while the floods occur in agricultural areas along the Ceyhan river and in the flat areas next to the river tributary.

Landsat 3 satellite images were checked for cloudiness in the selection of satellite images used in this study, and it was determined that the satellite image dated 01.04.1980 was appropriate (Table 1).

After Landsat 1 and Landsat 2, the Landsat 3 satellite was launched into space in 1978 to acquire images of the Earth from space [33]. The USGS made Landsat satellite data freely available in 2008 through a decision [34]. Table 2 shows the band characteristics of the Landsat 3 satellite.

**Table 1.** Name and date of the image used in the study

Date	Name of the image
01.04.1980	LM03 L1TP 188034 19800401 20210714 02 T2
01.04.1980	LM03 L1TP 188035 19800401 20210714 02 T2

**Table 2.** Band Specifications of Landsat 3 satellite [33]

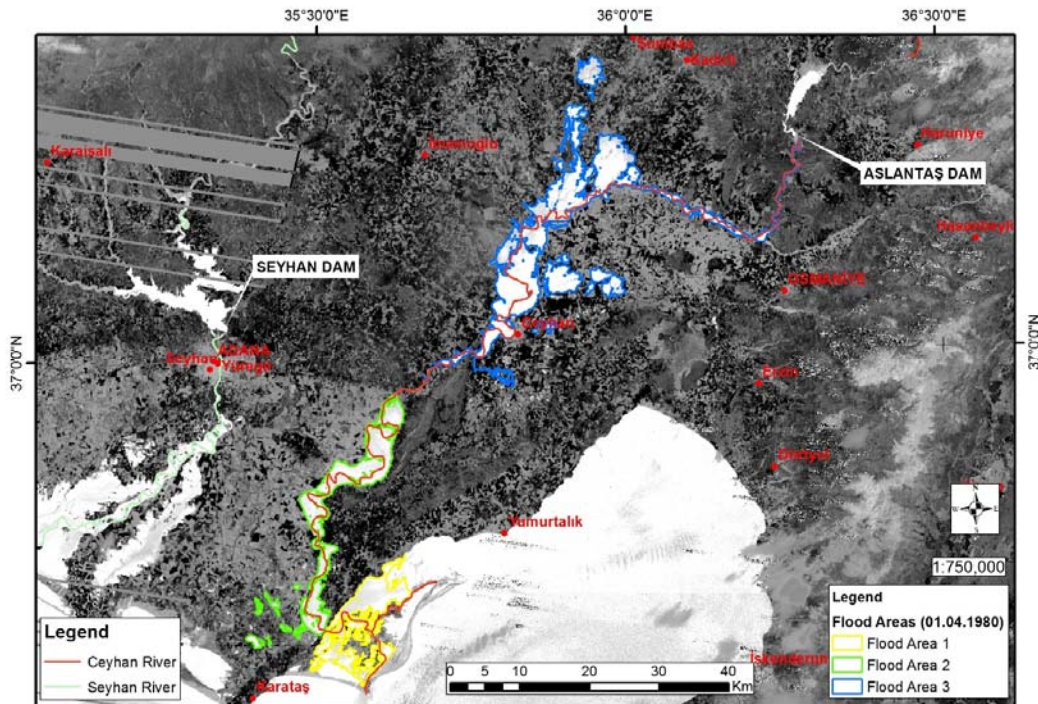
Band Number	Band name	Bandwidth (nm)	Resolution (m)
4	Green	0.5-0.6	60
5	Red	0.6-0.7	60
6	Near Infrared-NIR	0.7-0.8	60
7	Near Infrared-NIR	0.8-1.1	60

## 2.2. Method

Radiometric calibration and atmospheric adjustments were performed during the preparation of Landsat 3 images. The Normalized Difference Water Index (NDWI) approach uses the NIR and green bands to delineate and monitor content changes in surface water. The NDWI index is frequently utilized to determine water inundation areas in flood management studies using remote

sensing images. Several research throughout the world have employed the NDWI metric to designate floodplains [25, 29-30, 35-39]. In this study, NDWI was used to identify the flood inundated regions in the flood event. (1) gives the NDWI formula [40]. This formula was used to generate the NDWI image. Figure 2 depicts the NDWI picture for April 1, 1980.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$



**Figure 2.** The NDWI image of the flood area on 01.04.1980



### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The technique used in this work is a reassessment of past flood occurrences and flood spreading areas utilizing historical satellite data in places where flood effects were assessed by ground measurements based on the circumstances at the time.

When the first Landsat satellite was launched in 1972 and became freely available in 2008 as a result of a USGS decision [34], this study might have been conducted as early as 2008. The region was first seen by satellite during one of the worst floods in April 1980.

The image of Ceyhan River flood inundated areas on 01.04.1980 is given in Figure 3. Flood regions were divided into three sub-areas: Flood area 1, Flood area 2, and Flood area 3.

The coastline region was thought to be mainly inundated in the Flood area 1 (Figure 3.a) around the point where the Ceyhan River drains into the Mediterranean Sea. The flood inundated area was determined in a GIS environment to be 3493.45 ha in the north of Karataş in the Lower Ceyhan Plain, 7799.42 ha in the area between Bahçe, Akdeniz, and

Yumurtalık, 7404.9 ha in the area around Çatalpınar and Yakapınar in the Lower Ceyhan Plain, and approximately 24890 ha in the Upper Ceyhan.

In the 1980 flood disaster, Kozan Dam and Mehmetli Dam were existing water storage systems that contained upstream flood waters in their reservoirs. Kozan Dam and Mehmetli Dam were built on the Kilgen and Kesiksuyu streams, respectively, and were completed in 1972. Because the Meletmez and Savrun Dams were not built at this time, the flow in Sumbas Stream and Savrun Stream, which are tributaries of the Ceyhan River, caused several communities and agricultural regions in the Flood area 2 (Figure 3.b) to be flooded (Figure 4).

The construction of the Aslantaş Dam on the Ceyhan River started in 1975, and the dam was put into operation in 1984. During the flood on the Ceyhan River on April 1, 1980, the Aslantaş Dam was in the construction stage.

The flood water were accumulated in the upstream cofferdam of Aslantaş Dam and the reservoir area as seen in Figure 3. Kalecik Dam on Horu Stream was put into operation after the 1980 flood event. Flood inundated areas were spreaded to flat areas next to the river in the Flood area 3 (Figure 3.c).

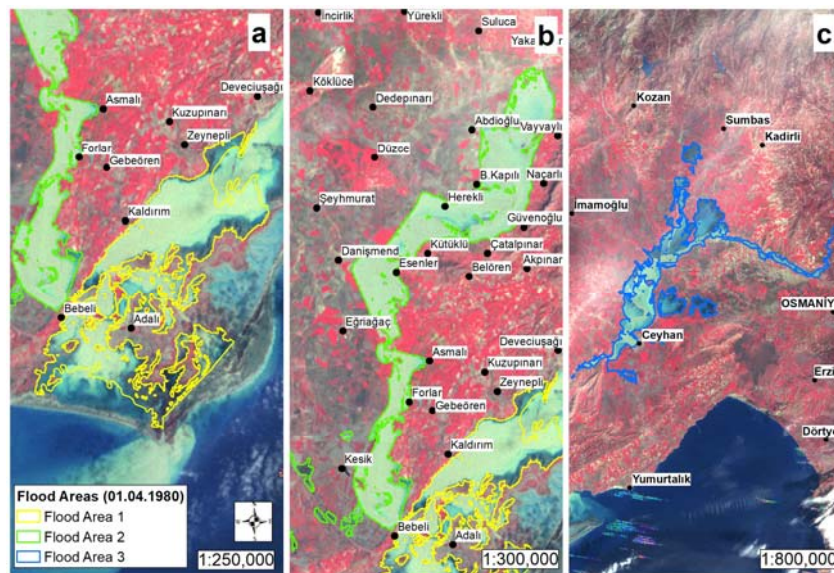
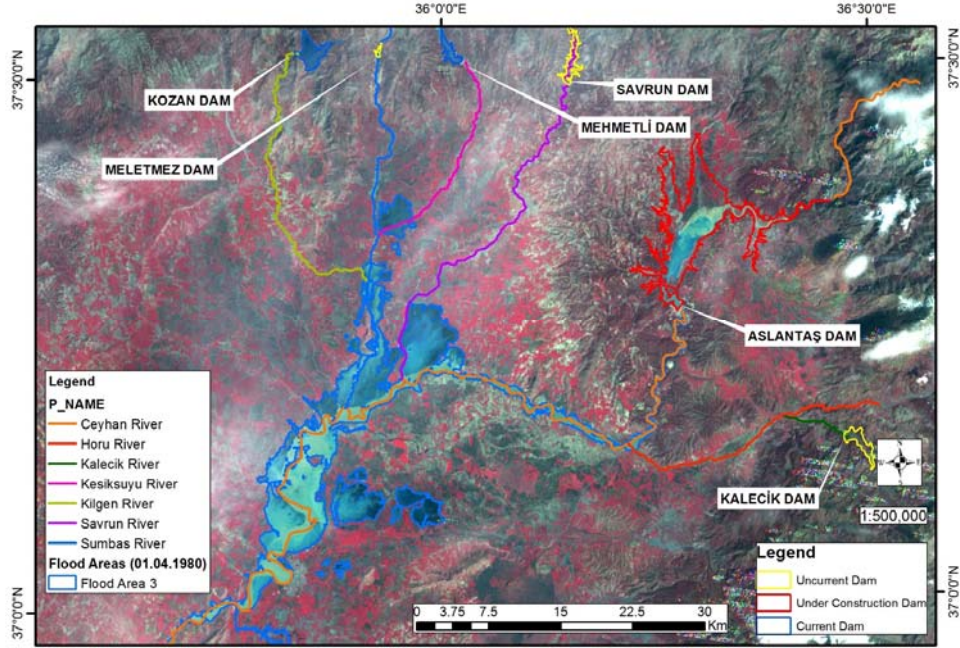


Figure 3. Ceyhan River flood inundated areas on 01.04.1980 (Landsat 3)

The results on determining flood inundated areas found in this study are consistent with the flood risk areas defined in the previous official reports.

Figure 5 shows an image of the Ceyhan flooded region in 1980.



**Figure 4.** Ceyhan River flood inundated areas and location of dams in Lower Ceyhan River Basin on 1 April 1980



**Figure 5.** Ceyhan River flood inundated areas in 1980 (from Metin Ozturk's photograph archive)

#### 4. CONCLUSION

The flood-inundated sites in the Lower Ceyhan Basin on April 1, 1980, were studied using archival satellite data. Flood areas were analyzed in this study in three sub-areas: Flood area 1, Flood area 2, and Flood area 3. The flood-inundated regions were analyzed in a GIS context and calculated as areal values.

The satellite-based remote sensing data have been widely used in flood monitoring, flood mapping and post-flood damage assessment tasks. It is feasible to detect flood inundated regions that cannot be accessed owing to bad physical circumstances, and that cannot be monitored by ground observations and surveys by employing satellite-based remote sensing data. To update and renew flood control operations, a study of all prior flood reports utilizing historical satellite data is necessary.

#### 5. REFERENCES

1. Shrubsole, D., Kreutzwiser, R., Mitchell, B., Dickinson, T., Joy, D., 1993. The History of Flood Damages in Ontario. *Canadian Water Resources Journal*, 18(2), 133-143.
2. Williams, A., Archer, D., 2002. The use of Historical Flood Information in the English Midlands to Improve Risk Assessment. *Hydrological Sciences Journal*, 47(1), 57-76.
3. Glaser, R., Stangl, H., 2003. Historical Floods in the Dutch Rhine Delta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 605-613.
4. Payrastre, O., Gaume, E., Andrieu, H., 2005. Use of Historical Data to Assess the Occurrence of Floods in Small Watersheds in the French Mediterranean Area. *Advances in Geosciences*, 2, 313-320.
5. Macdonald, N., 2006. An Underutilized Resource: Historical Flood Chronologies a Valuable Resource in Determining Periods of Hydro-geomorphic Change, Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems. *Proceedings of a Symposium Held in Dundee, UK, IAHS Publ.*, 306.
6. Macdonald, N., Black, A.R., 2010. Reassessment of Flood Frequency Using Historical Information for the River Ouse at York, UK (1200–2000). *Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(7), 1152-1162.
7. Macdonald, N., Kjeldsen, T.R., Prosdocimi, I., Sangster, H., 2014. Reassessing Flood Frequency for the Sussex Ouse, Lewes: The Inclusion of Historical Flood Information Since AD 1650. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2817-2828.
8. Strupczewski, W.G., Kochanek, K., Bogdanowicz, E., 2014. Flood Frequency Analysis Supported by the Largest Historical Flood. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1543-1551.
9. Herget, J., Roggenkamp, T., Krell, M., 2014. Estimation of Peak Discharges of Historical Floods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4029-4037.
10. Machado, M.J., Botero, B.A., López, J., Francés, F., Díez-Herrero, A., Benito, G., 2015. Flood Frequency Analysis of Historical Flood Data under Stationary and Non-stationary Modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2561-2576.
11. Enciso, A.M., Carvajal-Escobar, Y., Sandoval, M.C., 2016. Hydrological Analysis of Historical Floods in the Upper Valley of Cauca River. *Ingeniería y Competitividad*, 18(1), 47-58.
12. Pal, R., Biswas, S.S., Mondal, B., Pramanik, M.K., 2016. Landslides and Floods in the Tista Basin (Darjeeling and Jalpaiguri Districts): Historical Evidence, Causes and Consequences. *J. Ind. Geophys. Union*, 20(2), 66-72.
13. Deutch, M., Reeh, T., Karthe, D., 2018. Severe Historical Floods on the River Roda, Thuringia: from Reconstruction to Implications for Flood Management. *DIE ERDE*, 149(2-3), 64-75.
14. Engeland, K., Wilson, D., Borsányi, P., Roald, L., Holmqvist, E., 2018. Use of Historical Data in Flood Frequency Analysis: A Case Study for Four Catchments in Norway. *Hydrology Research*, 49(2), 466-486.
15. Islam, M., Sado, K., 2000. Satellite Remote Sensing Data Analysis for Flood Damaged Zoning with GIS for Flood Management. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 44, 301-306.
16. De Groeve, T., 2010. Flood Monitoring and Mapping Using Passive Microwave Remote

- Sensing in Namibia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(1), 19-35.
17. Schnebele, E., Cervone, G., 2013. Improving Remote Sensing Flood Assessment Using Volunteered Geographical Data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 669-677.
  18. Long, S., Fatoyinbo, T.E., Policelli, F., 2014. Flood Extent Mapping for Namibia Using Change Detection and Thresholding with SAR. *Environ. Res. Lett.*, 9, 035002.
  19. Martinis, S., Rieke, C., 2015. Backscatter Analysis Using Multi-Temporal and Multi-Frequency SAR Data in the Context of Flood Mapping at River Saale, Germany. *Remote Sens.*, 7, 7732-7752.
  20. Hazır, İ., Akgül, M.A., Alkaya, M., Dağdeviren, M., 2016. 27 Ocak-14 Mart 2012 Tarihleri Arasında Hatay İli Amik Ovasında Meydana Gelen Taşkınların Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi, 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu Tebliğler Kitabı, 55-66, Rize.
  21. Akgül, M.A., 2018. Sentetik Açıklıklı Radar Verilerinin Taşkın Çalışmalarında Kullanılması: Berdan Ovası Taşkını. *Geomatik Dergisi*, 3(2), 154-162.
  22. Yulianto, F., Suwarsono, N., Sulma, S., Khomarudin, M.R., 2018. Observing the Inundated Area Using Landsat-8 Multitemporal Images and Determination of Flood-prone Area in Bandung Basin. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 15(2), 131-140.
  23. Ul Moazzam, M.F., Vansarochana, A., Rahman, A.U., 2018. Analysis of Flood Susceptibility and Zonation for Risk Management Using Frequency Ratio Model in District Charsadda, Pakistan. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5(2), 140-153.
  24. Alahacoon, N., Matheswaran, K., Pani, P., Amarnath, G., 2018. A Decadal Historical Satellite Data and Rainfall Trend Analysis (2001–2016) for Flood Hazard Mapping in Sri Lanka. *Remote Sens.*, 2018(10), 448.
  25. Enea, A., Urzica, A., Breaban, I.G., 2018. Remote Sensing, GIS and HEC-RAS Techniques, Applied for Flood Extent Validation, Based on Landsat Imagery, LIDAR and Hydrological Data. Case Study: Baseu River, Romania. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 19(3), 1091-1101.
  26. Akgül, M.A., Çetin, M., 2019. Tarımsal Drenaj Alanlarında Meydana Gelen Taşkınlar ve Etki Alanlarının Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi: Aşağı Seyhan Ovası Alt Havzasında Örnek Bir Çalışma. 10. Ulusal Hidroloji Kongresi, 9-12 Ekim 2019, Muğla.
  27. Bhattacharya, B., Mazzoleni, M., Ugay, R., 2019. Flood Inundation Mapping of the Sparsely Gauged Large-Scale Brahmaputra Basin Using Remote Sensing Products. *Remote Sens.*, 11, 501.
  28. Güvel, Ş.P., Akgül, M.A., Aksu, H., 2022. Flood Inundation Maps Using Sentinel-2: a Case Study in Berdan Plain. *Water Supply*, 22(4), 4098-4108.
  29. Munasinghe, D., Cohen, S., Huang, Y., Tsang, Y., Zhang, J., Fang, Z., 2018. Intercomparison of Satellite Remote Sensing-Based Flood Inundation Mapping Techniques. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 54(4), 834-846.
  30. Dash, P., Sar, J., 2020. Identification and Validation of Potential Flood Hazard Area Using GIS-based Multi-Criteria Analysis and Satellite Data-derived Water Index. *J Flood Risk Management*, 13(11), 1-14.
  31. DSİ, 1980. Seyhan Taşkın Raporu (27 Mart 1980-6 Nisan 1980), Ankara.
  32. IECO, 1966. Water Resources Development Ceyhan Basin Projects Seyhan Basin Projects Berdan Project Develi Project Amik Project Master Plan. May 1966, International Engineering Company, Inc. 74 New Montgomery St. San Fransisco 5, California.
  33. U.S. Geological Survey, 2016. Landsat-Earth observation satellites (ver. 1.2, April 2020): U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2015–3081, 4.
  34. NASA, 2022. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html), Access date: 05.01.2022.
  35. Ogashawara, I., Curtarelli, M.P., Ferreira, C.M., 2013. The Use of Optical Remote Sensing For Mapping Flooded Areas. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, 3(5), 1956-1960.

36. Suwarsono, Nugroho, J.T., Wiweka, 2013. Identification of Inundated Area Using Normalized Difference Water Index (NDWI) on Lowland Region of Java Island. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 10(2), 114-121.
37. Rotjanakusol, T., Laosuwan, T., 2018. Inundation Area Investigation Approach Using Remote Sensing Technology on 2017 Flooding in Sakon Nakhon Province Thailand. *Studia Universitatis Vasile Goldis, Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*, 28(4), 159-166.
38. Silas, M.Y., Taofeek, S.A., Adewale, A.K., Adeyemi, S.S., Victor, D., 2019. Flood Inundation and Monitoring Mapping in Nigeria Using Modis Surface Reflectance. *Journal of Scientific Research & Reports*, 22(1), 1-12.
39. Kashyap, M., Bhatt, C.M., Rawat, J.S., Suthar, K., 2021. Application of Sentinel 2 Data for Extraction of Flood Inundation Along Ganga River, Bihar. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)*, 10(3), 47-52.
40. McFeeters, S., 1996. The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.



## Uzak Kule Merkezi ile Kontrol Edilen Havalimanlarında Bulanık Mantık Tabanlı Uçak İniş Öncelik Sıralaması

Hatice DOĞAN<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-4162-1319

Fatma YILDIRIM DALKIRAN<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0001-8663-241X

<sup>1</sup>Kapadokya Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Nevşehir

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Kayseri

Geliş tarihi: 12.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: DOĞAN, H., YILDIRIM DALKIRAN, F., (2024). Uzak Kule Merkezi İle Kontrol Edilen Havalimanlarında Bulanık Mantık Tabanlı Uçak İniş Öncelik Sıralaması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 95-106.

### Öz

Hava taşımacılığı, bilinen en güvenli ve emniyetli ulaşım şeklidir. Yapılan incelemeler sonucunda hava taşımacılığında meydana gelen kazaların büyük bir yüzdesinin yaklaşma safhasında meydana geldiği görülmüştür. İncelenen çalışmalarda hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün ve stresinin arttığı gözlemlenmiştir. Trafik kontrolörlerinin iş yükünü azaltmak ve stresi dengelemek konuları araştırmacılara yeni çalışma sahaları açmıştır. Bu sahalardan biri olan uzak kule merkezi çalışmaları, kule çalışanlarının fazla iş yükü dahil hava trafiği kontrolü problemlerine çözüm olarak sunulmuştur. Günümüzde maliyet ve emniyet açısından da büyük avantajlar sağlayacağı düşünülen uzak kule merkezi üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir. Bu çalışmada uzak kule merkezinden kontrol edilen havalimanlarına iniş için yaklaşmakta olan uçaklara iniş önceliği verilmesi için bulanık mantık tabanlı karar destek sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem için havalimanlarının ortalama günlük uçuş sayısı, havalimanı karar yüksekliği ve yaklaşma aşamasındaki uçağın hızı ve irtifası, girdi parametreleri olarak belirlenmiştir. Oluşturulan bulanık mantık modellemesinde MATLAB/FIS arayüzü kullanılmıştır. Bu arayüz kullanılarak uzak kule merkezi tarafından kontrol edilen havalimanlarına yaklaşmakta olan uçaklar için iniş sıralaması belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bulanık mantık, Uzak kule merkezi, İniş sıralaması, Hava trafik kontrolörü

### Fuzzy Logic Based Aircraft Landing Priority at Airports Controlled by Remote Tower Center

#### Abstract

Air transportation is the safest and secure way of transportation. It has been seen as a result of the investigations that a large percentage of the accidents by air transport occur during the approach phase. In

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Fatma YILDIRIM DALKIRAN, fatmay@erciyes.edu.tr

the studies examined, it was observed that the workload and stress of air traffic controllers increased. Reducing the workload of traffic controllers and balancing stress has opened new fields of work for researchers. Remote tower center studies, one of these fields, are presented as a solution to air traffic control problems, including excessive workload of air traffic workers. Today, continuous studies on the remote tower center is thought to provide great advantages in terms of cost and safety. In this study, a fuzzy logic-based decision support system was developed to give landing priority to approach aircraft for landing at airports controlled by the remote tower center. For this system, the average number of daily flights of the airports, the airport decision altitude and the velocity and altitude of the aircraft in the approach phase are determined as input parameters. MATLAB/FIS interface was used in the developed fuzzy logic modeling. This distribution sequenced landings for aircraft approaching airports controlled by the remote tower center.

**Keywords:** Fuzzy logic, Remote tower center, Landing arrangement, Air traffic controller

## 1. GİRİŞ

Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı'na (International Civil Aviation Organization, ICAO) göre, havalimanlarının bir parçası olan hava trafik kontrol (Air Traffic Control, ATC) hizmetinin temel görevi, uçuşun herhangi bir safhasında uçakların birbirleri ile veya diğer engeller ile çarpışmasının önüne geçerek, hava trafiğinin emniyetli ve düzenli akışını sağlamaktır [1]. Bu işi gerçekleştiren hava trafik kontrol kuleleri bulunurken özellikle uçuş sayısı düşük olan havalimanlarının kapanmasını önlemek amaçlı uzak kule merkezleri oluşturulmaya başlanmıştır. Bu merkezler, bir ya da daha fazla havalimanında bulunan hava araçlarının düzenli akışını ve yönlendirmesini uzaktan sağlamaktadır [2].

Uçaklar belirli bir başlangıç noktasından varış noktasına giderken beş aşamadan oluşan uçuş sürecine sahiptir. Bunlar geliş, ilk yaklaşma, ara yaklaşma, son yaklaşma, pas geçmedir. 8 Ocak 2003 tarihinde Diyarbakır'da meydana gelen uçak kazasının ardından Boeing firması, 1959-2001 yılları arasında olan ticari uçak kazalarını inceleyen bir rapor hazırlamıştır. Bu rapora göre uçak kazalarının %54'ü son yaklaşma safhasında meydana gelmiştir [3]. 2017 yılında yapılan çalışmalarda Türk hava sahasında meydana gelen en ölümcül kazaların daha çok yaklaşma safhasında meydana geldiği görülmüştür [4,5]. 2020 yılında yapılan "havacılık kazası ve pilot hatası kavramı üzerine bir değerlendirme" isimli çalışmada uçak kazalarına ilişkin elde edilen istatistiki verilere göre iniş ve yaklaşma aşamalarında daha çok uçak kazası yaşandığı tespit edilmiştir [6]. Bu bağlamda

günümüzde hava trafiğinin yoğun olduğu düşünüldüğünde, uçaklar iniş aşamasında iken hava trafik kontrolörlerine daha büyük bir sorumluluk düştüğü söylenebilir.

Literatürde hava trafik hizmetlerinin daha verimli olabilmesi ve hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün azaltılması için uçakların iniş sıralamasının yapılması hususunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan biri olan ve Kıyak tarafından yapılan bir çalışmada, havalimanlarına yaklaşmakta olan uçaklar için iniş sıralamasını sağlamak üzere oluşturulan, tavsiye niteliğinde olan karar destek uygulamasına yer verilmiştir [7]. Başka bir çalışmada şiddetli rüzgarlara ve sıkışmış kontrol yüzeyleri gibi arızalara maruz kalan hava araçları için iniş aşamasında hataya dayanıklı akıllı iniş sistemi sunulmuştur [8]. Ören ve Koçyiğit tarafından yapılan çalışmada ise MATLAB/FIS arayüzü kullanılarak, insansız hava araçlarının iniş sıralamasının belirlenmesi amaçlanmıştır [9].

Bulanık mantık birçok alanda kullanılmasının yanı sıra havacılık alanında da kullanılmakta ve kullanılmaya devam etmektedir [10-13]. Bunlardan biri olan ve Kıyak ve Kahvecioğlu'nun yaptığı çalışmada bulanık mantık yöntemi, bir hava aracının son yaklaşma ve iniş aşamasındaki uygun kontrol kuvvetinin bulunması için kullanılmıştır [10]. Sergaki ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise bir ticari hava aracının uçuş kontrol sistemi için bulanık mantık uygulamasını kullanmışlardır [11]. Bu uygulama sayesinde uçakta bulunan iki sensörden herhangi birinin arızalanması durumunda hangisinin arızalandığını tespit etmek mümkün olmuştur. 2002 yılında Federal Aviation



Administration'in (FAA) yaptığı çalışmada ise tecrübelerine göre pilotlar arasında gruplar oluşturulmuş ve kalkıştan inişe kadar 3 boyutlu bir uçuş rotası üzerinde uçuş yapmalarını sağlamak üzere simülasyonlar oluşturulmuştur [12]. Bu uygulamada bulanık mantık, performans kriteri aşamasında kullanılmıştır. Başka bir çalışmada da pilota helikopterin hangi manevrayı yapması gerektiğini gösteren bir kontrol sistemi tanıtılmıştır [13]. Pilotun eylemlerini gerçekleştirmek için, geleneksel helikopter kontrollerinin her biri için birer tane olmak üzere iki ayrı bulanık kontrolör geliştirilmiştir. Bir diğer çalışmada savaş, hava durumu ve afet izleme, görüntüleme spektrometresi ve keşif için özel ve/veya gizli operasyonlar yürütebilen, tamamen bağımsız İHA'ların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Hava aracının herhangi bir bileşeninde sorun olduğunda ve hava aracının işlevselliğini azaltan bir durumla karşılaşıldığında sistemin geliştirilmesi için bulanık mantığın kullanılması önerilmiştir [14]. Saray ve Kıyak'ın yaptıkları çalışmada ise uçuş esnasında kabin basıncının sabit tutulmasına yönelik bir öneri sunulmuştur [15]. Çalışmada, uçak irtifası ve ölçülen kabin içi basınç, giriş verileri olarak, çıkış olarak ise hedef kabin basıncı değeri seçilmiş ve Mamdani çıkarım yöntemi kullanılmıştır [15]. Başka bir çalışmada ise hava aracı pitot-statik sistemde çıkabilecek arıza durumunda alternatif bir sistemin oluşturulması amaçlanmıştır [16]. Bu alternatif yöntem ile iki giriş-bir çıkışlı bulanık mantık yöntemi kullanılarak irtifa tahmini yapılmıştır. Jian ve ekibi tarafından yapılan çalışmada ise, bulanık mantık kullanılarak Boeing 737-800 uçağının kabin sıcaklık kontrol sistemi tasarlanmıştır [17]. Başka bir çalışmada da hava taşımacılığının büyümesi göz önünde bulundurularak, uçuş trafiğinde güvenli bir yönetim için bulanık mantığa dayalı teknolojik sistemlerin kullanılması önerilmiştir [18]. Konar'ın yaptığı çalışmada da insansız hava aracı kanat tasarımında ANFIS bulanık çıkarım sistemi ile diferansiyel arama algoritmasına dayalı yeni bir yöntem sunulmuştur [19]. Bir diğer çalışmada ise uçuş sırasında pilot ve uçuş kontrol sistemlerinin kritik durumlarda karar verme kabiliyetini artırmak amaçlı, hız ve yakıt parametrelerinin eş zamanlı hesaplanması için bulanık tabanlı bir model tasarlanmıştır [20].

Literatürde uzak kule merkezi tarafından kontrol edilen havalimanlarında hava trafiğinin daha kontrollü olmasını sağlamaya yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada bulanık mantık kullanılarak, uzak kule merkezinden kontrol edilen havalimanlarında, iniş için yaklaşmakta olan uçaklara iniş önceliği verilmesine yönelik karar destek sisteminin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu bağlamda bulanık mantık tabanlı bir model oluşturulmuştur.

## 2. BULANIK MANTIK

Bulanık mantık, klasik mantık sistemlerinden farklı olarak, insanın belirsizlik ve kesin olmayan bir ortamda rasyonel kararlar verme konusundaki yeteneğini modellemeyi amaçlar [21]. Mantıkçılar, bulanık mantığın ilk kavramını 1920'lerde ortaya atarak, her şeyin bir derece meselesi olduğunu savunmuşlardır. Bulanık mantık, mühendislerin ne kadar hızlı çalışması gerektiğine veya bir ayardan diğerine geçmeleri gerektiğine karar veren iklimler, çamaşır makineleri ve diğer cihazları yapmalarına yardımcı olmaktadır.

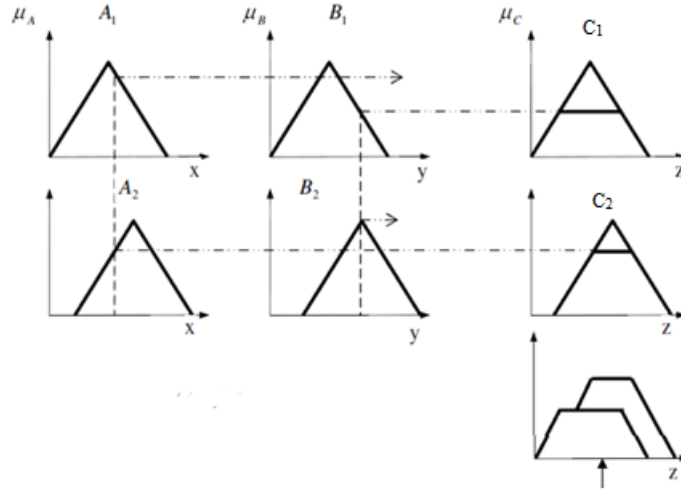
Matematikçiler, bir sistemin girdilere nasıl yanıt vermesi gerektiğini ifade eden belirli algoritmalara sahip olmadığında, bulanık mantık, belirsiz niceliklere atıfta bulunarak, "sağduyu" kurallarını kullanarak sistemi kontrol edebilir veya tanımlayabilir.

1980'de Kopenhag'daki F.L. Smidth müteahhitlik firması, çimento firması sisteminin işleyişini denetlemek için bulanık sistemi kullanan ilk kullanıcıdır. 1988'de Hitachi, Japonya'nın Sendai kentindeki bir metronun kontrolünü bulanık bir sisteme devretmiştir. Bu tarihten beri de Japon şirketleri, yüzlerce ev aletini ve elektronik ürünü yönetmek için bulanık mantık kullanmışlardır. Uluslararası Ticaret ve Sanayi Bakanlığı, 1992'de Japonya'nın yaklaşık 2 milyar dolar değerinde bulanık mantık ürünü ürettiğini tahmin etmektedir [22].

Bilimsel çalışmalarda tercih edilen iki tip bulanık çıkarım sistemi bulunmaktadır. Bunlar, Mamdani tip ve Takagi-Sugeno tip olarak adlandırılmaktadır. Mamdani tipi bulanık çıkarım sisteminin

oluşturulması basit olup, diğer bulanık mantık modellerinin temelini oluşturmaktadır. Uzmanlığı daha sezgisel tanımlamaktadır. Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi ise hesaplama açısından daha verimlidir ve optimize edilebilir

tekniklerle çalışmaya uyumludur. Bu da onu özellikle dinamik doğrusal olmayan sistemler için olan kontrol problemlerinde kullanılmasını sağlar [23].



**Şekil 1.** Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla minimizasyon ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi [24]

Bu çalışmada Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi ve ağırlık merkezi durulaştırma metodu kullanılmıştır. Ağırlık merkezi metodunda işlenen kurallar ile elde edilen bütün çıkışa ait bulanık kümeler hesaplamaya katılır. Dolayısıyla aktif olan pek çok kural karşılama dereceleriyle ortalamaya girer. Daha hassas bir sonuç elde edilir ve bu sebepten bu çalışmada ağırlık merkezi durulaştırma metodu kullanılmıştır. Bu bulanık modellemede girdi ve çıktı karar değişkenleri kapalı formdaki üyelik fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü üzere  $x$  ve  $y$  gibi iki değişkeni içeren iki kurallı bir Mamdani tipi bulanık mantık modelinde  $z$  çıkış değerinin  $C_i$  bulanık küme fonksiyonlarından nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

**Kural 1:** Eğer  $x \in A_1$  ve  $y \in B_1$  ise  $z \in C_1$

**Kural 2:** Eğer  $x \in A_2$  ve  $y \in B_2$  ise  $z \in C_2$

Bulanık mantık uygulamalarında sistem performansı artar ve aynı zamanda uygulama basitleşerek, mali giderler de azalır. Bulanık mantık sayesinde gerçek sisteme yönelik kural tabloları

oluşturularak, sistem performansının daha iyi olması sağlanabilmektedir [24].

Bulanık mantığın bilgisayar alanında, yapay zeka çalışmalarındaki olumlu etkileri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca birçok endüstriyel alanda, jeodezik problemlerin çözümü gibi pek çok mühendislik alanlarında kullanılabilmektedir [25].

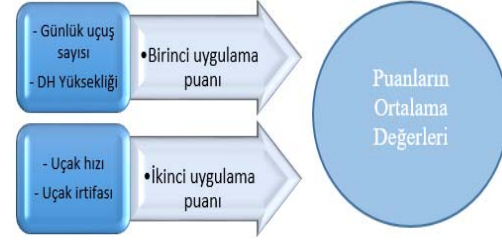
### 3. UZAK KULE MERKEZİ

Hava trafiği gün geçtikçe tüm dünyada yaygınlaşmaktadır. Yolcu sayısının artışı ile uçuş trafiği de sürekli artış göstermektedir. Uçuşların artmasına bağlı olarak hava seyrüsefer hizmeti sağlayıcılarının (Air Navigation Service Provider, ANSP) üzerindeki iş yükü de artmaktadır. Hava trafik yönetimi (Air Traffic Management, ATM), işleyişinin sürekliliği ve bakımı için sabit bir maliyet oluşturmaktadır. Havalimanlarında bu maliyet ise uçuş ve yolcu sayısına bağlı olarak değişmektedir. Günlük uçuş sayısı çok olan büyük havalimanları tarafından maliyet, kolaylıkla

karşılabilirken, uçuş sayısı az olan küçük ya da orta ölçekli havalimanları tarafından zor karşılanmaktadır. Uçuş sayısı az olan küçük havalimanlarının kapanmasının önüne geçilmesi ve havalimanından elde edilen kârın artması amacıyla, en az iki havalimanının kontrolünün ve trafiğinin yönlendirmesini uzaktan sağlayan merkezlere “uzak kule merkezi” denir [26]. Uzak kule merkezi kurulumunda pencere dışı görünümün (Out of The Window View, OTW) yerini kameralar almıştır ve bu sayede havalimanının görünümü elektronik olarak izlenmektedir. Uzak kule merkezi kavramında, yerel havalimanındaki ekipmanlardan alınan havalimanına ait görüntülerin, meteorolojik sensörler, seyrüsefer yardımcıları, VHF radyo sistemleri gibi ekipmanlardan alınan verilerin uzak kule merkezine iletimi için geniş alan ağı (Wide Area Network, WAN) kullanılmaktadır. Uzaktan kule merkezi ile bir havalimanı kontrol edilebileceği gibi, uçuş sayısı az olan, birden fazla küçük havalimanlarının kontrolü de mümkündür. Birden fazla kulenin hizmet ve bakım maliyetleri, uzak kule merkezi sayesinde azaltılarak, verimlilik artırılmış olacaktır [2].

Bu çalışmada uzak kule merkezinden kontrol edilen havalimanlarında uçuş safhalarının en kritik aşaması olan yaklaşma safhasında olan uçakların uygun bir şekilde indirilmesi amaçlanarak, bulanık mantık tabanlı bir model oluşturulmuştur. Bu model ile hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün azaltılması ve emniyetin artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda havalimanlarına yaklaşmakta olan uçakların hızı, irtifası, uzaktan kontrol edilen havalimanlarının ortalama günlük uçuş sayısı, karar yüksekliği (Decision Height, DH), iniş önceliği sıralamasında önemli parametreler olarak belirlenmiş olup, giriş olarak seçilmiştir. Bu parametrelerden DH ve günlük uçuş sayıları ile uçağın hızı ve irtifası, 2 giriş-1 çıkış olacak şekilde ayrı ayrı ele alınmıştır. Günlük uçuş sayısı ve karar yüksekliği (DH), havalimanına ait parametreler; uçak hızı ve irtifası ise uçağa ait parametreler olmasından dolayı ve daha hassas sonuç alınması amacıyla 2 giriş-1 çıkış şeklinde ayrı ayrı kural tablosu oluşturulması, durulaştırma aşamasında daha fazla hassasiyet sağlayacaktır. Çalışmada çözümün daha basit ve hızlı olması açısından üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Daha karmaşık

üyelik fonksiyonları kullanılabilir fakat karmaşıklık artar ve daha fazla hesaplama gücü gerekir [27]. Verilerin giriş-çıkış şematiği Şekil 2’de yer almaktadır. Sonuçta da çıkıştan elde edilen puanlar değerlendirilmiştir.

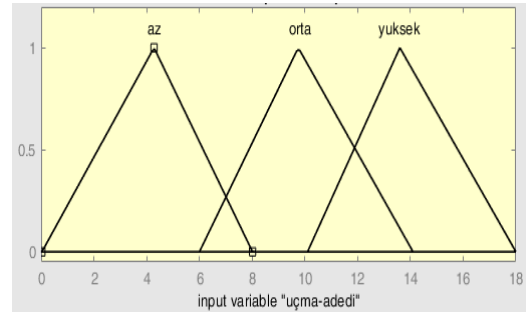


Şekil 2: Verilerin giriş-çıkış şematiği

## 4. MODELLEME VE SONUÇLARI

### 4.1. Havalimanı Günlük Uçuş Sayısı

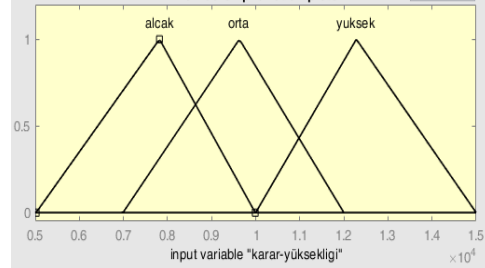
Havalimanlarının uçuş yoğunluğu, iniş sıralamasında önemli bir faktördür. Uçuş yoğunluğu fazla olan havalimanlarına iniş ve kalkış aşamalarındaki öncelik durumları, bazı özel durumlara göre farklılık arz edebilmektedir. Bu çalışmada uçuş yoğunluğu yani uçuş sayısı az olan ve birbirlerine yakın olan Kars Harakani, Ağrı Ahmed-i Hani ve Iğdır Şehit Bülent Aydın Havalimanları'nın uzak kule merkezi uygulaması ele alınmıştır. Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nin (DHMI) 2023 Ocak ayı verilerinden yararlanılarak bu havalimanlarının ortalama günlük uçuş sayıları sırasıyla Kars 11, Ağrı 5, Iğdır 10 olarak hesaplanmıştır [28]. Bu hesaplamalardan yola çıkarak uçuş sayısına ait üyelik fonksiyonları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3: Uçuş sayısı üyelik fonksiyonu

## 4.2. Havalimanı Karar Yüksekliği

Bir havalimanında yaklaşma safhasında ortaya çıkabilecek durumlardan dolayı pas geçme usulünün başlayacağı irtifa veya yükseklik değeri hesaplanarak, karar yüksekliği (Decision Height, DH) belirlenir. Havalimanlarının etrafında bulunan engebeler veya yapılar, değişiklik gösterdiğinden, havalimanlarının karar yüksekliği de değişmektedir. Uçakların pas geçme yüksekliğinin değeri, iniş sıralamasında öncelik açısından önemli bir kriterdir. Yüksekliğin fazla olması, hata toleransını da artırmaktadır. Havacılık Enformasyon Yayını'ndan (Aeronautical Information Publication, AIP) elde edilen verilere göre Kars Harakani, Ağrı Ahmed-i Hani ve Iğdır Şehit Bülent Aydın Havalimanları'nın karar yükseklikleri sırasıyla 10000 ft, 9900 ft ve 14000 ft olup, üyelik fonksiyonları, Şekil 4'te verilmiştir [29].



Şekil 4. DH üyelik fonksiyonu (ft)

## 4.3. Uçanın Hızı

Havalimanlarında iniş sıralaması yapılırken piste yaklaşmakta olan uçakların hızı da sıralamayı belirleyen bir diğer kriter olarak kabul edilmiştir. Çalışmada yakın tarihte gerçekleşen seferlerde İstanbul-Kars, İstanbul-Ağrı, İstanbul-Iğdır rotaları Flight radar uygulamasının web sitesinden alınarak, uçuşların yaklaşma safhasındaki hız ve irtifa değerleri hesaba katılmıştır. Şekil 5'te de yaklaşma safhasındaki bahsi geçen uçakların hızı ve irtifası bulunmaktadır.

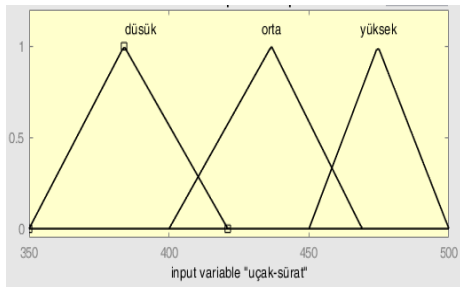


Şekil 5. Yaklaşma safhasındaki uçaklara ait hız ve irtifa bilgisi [30]

Havalimanlarına yaklaşmakta olan uçakların hızları, Çizelge 1’de [30], uçakların hızına ait üyelik fonksiyonu, Şekil 6’da verilmiştir.

**Çizelge 1.** Havalimanlarına yaklaşmakta olan uçaklara ait hız bilgileri [30].

Havalimanı	Yaklaşmakta olan uçağın hızı
Kars Harakani	455 km/h
Ağrı Ahmed-i Hani	451 km/h
Iğdır Şehit Bülent Aydın	444 km/h



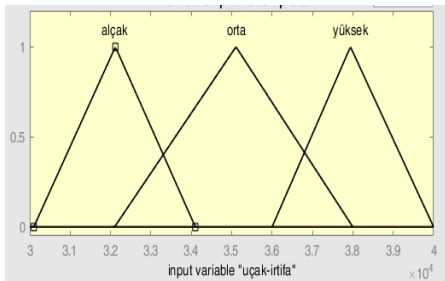
**Şekil 6.** Hız üyelik fonksiyonları (km/sa)

#### 4.4. Uçağın İrtifası

Havalimanlarında iniş sıralaması belirlenirken dikkat edilecek bir kriter de yaklaşma safhasındaki uçakların irtifalarıdır. Uçaklara ait irtifa değerleri, Çizelge 2’de yer alırken [30], irtifalara ait üyelik fonksiyonları Şekil 7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Havalimanlarına yaklaşmakta olan uçaklara ait irtifa bilgileri [30]

Havalimanı	Yaklaşmakta olan uçağın irtifası
Kars Harakani	32625 ft
Ağrı Ahmed-i Hani	33000 ft
Iğdır Şehit Bülent Aydın	36600 ft



**Şekil 7.** İrtifaya ait üyelik fonksiyonları (ft)

#### 4.5. Gerçekleştirilen Modelleme

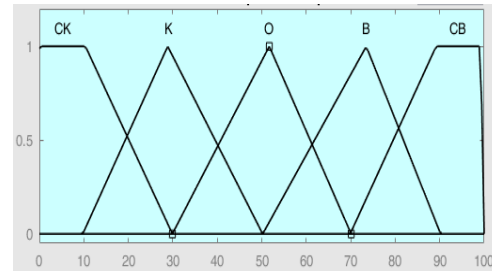
Modellemede iniş sıralamasını oluşturmak üzere puanlandırma yapılabilmesi için günlük uçuş sayısı ve karar yüksekliği girişleri ile oluşturulan ilk kural tablosu, Çizelge 3’te verilmiştir. Giriş olarak uçağın hızı ve irtifası olarak verilen 2. modellemenin kural tablosu ise Çizelge 4’te yer almaktadır. Bu tablolarda ÇK-Çok Küçük, K-Küçük, O-Orta, B-Büyük, ÇB-Çok Büyük anlamına gelmektedir. Bulanık denetleyicide oluşturulan puanlandırma üyelik fonksiyonu da Şekil 8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Uçuş sayısı-karar yüksekliği kural tablosu

		Günlük uçuş sayısı		
		Az	Orta	Çok
Karar yüksekliği	Alçak	B	B	ÇB
	Orta	K	O	B
	Yüksek	ÇK	K	B

**Çizelge 4.** Uçağa ait hız-irtifa kural tablosu

		Uçağın hızı		
		Az	Orta	Çok
Uçağın irtifası	Alçak	B	B	ÇB
	Orta	K	O	B
	Yüksek	ÇK	K	B



**Şekil 8.** Puanlandırma üyelik fonksiyonu

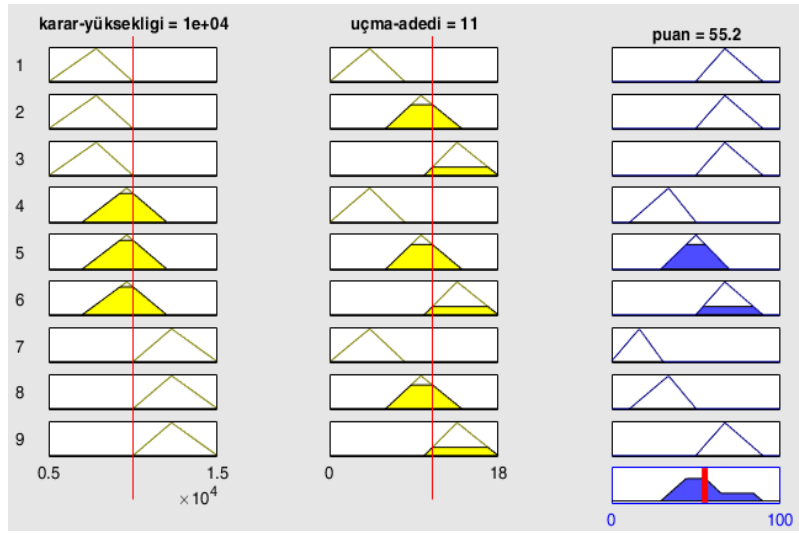
Uygulamada uçuş sayısı, havalimanı karar yüksekliği, uçak hızı ve irtifası giriş olarak kabul edilmiştir. Toplamda 18 adet kural oluşturulmuş ve çıkış puan tablosuna göre havalimanı iniş sıralaması belirlenmiştir. Uygulamada parametreler, 2 giriş-1 çıkış şeklinde değerlendirildiği için sonuçta iki farklı puan elde edilmiştir. Havalimanına ait karar yüksekliği ve uçağın irtifası birbirini etkileyen parametreler olması sebebiyle de iki farklı sonucun

ortalaması alınmıştır [31]. Değerlendirilen tüm parametrelerin eşit değere sahip olduğu kabul edilerek, puanların ortalaması alınmış ve bulanık kümesine durulama uygulandığında çıkış, tek bir sayısal değer olarak belirlenmiştir.

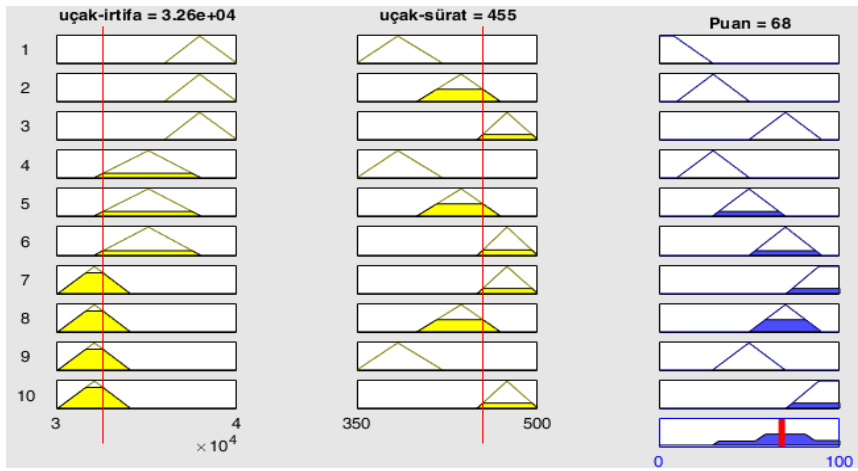
Oluşturulan kural tablosuna göre havalimanına yaklaşmakta olan en yüksek puan değerine sahip uçağın iniş önceliği olmaktadır. Havalimanlarına

yaklaşmakta olan uçakların iniş sıralaması, puanları ile doğru orantılıdır.

Uçuş sayısı-DH girişlerinin kural tablosunda değerlendirilmesi sonucunda Kars Harakani Havalimanı için elde edilen puan değeri 55.2 olup, Şekil 9'da verilmiştir. Bu havalimanı için uçağın hızı ve irtifası girişleri değerlendirilerek, 68 puan değeri elde edilmiştir ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Kars Harakani Havalimanı için uçuş sayısının ve DH'nin kullanıldığı birinci çıkış puan tablosu



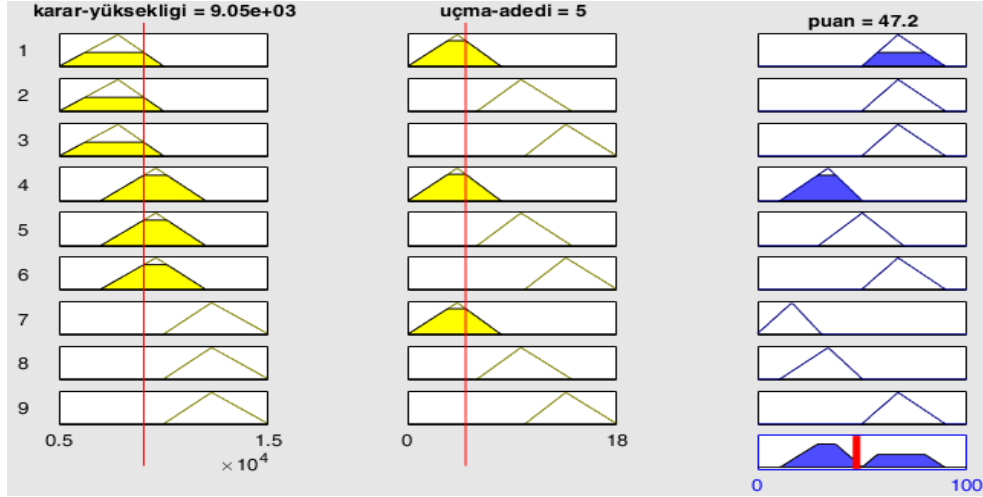
Şekil 10. Kars Harakani Havalimanı için uçağın hızının ve irtifasının kullanıldığı ikinci çıkış puan tablosu

Şekil 11'de yer alan uçuş sayısı- DH girişlerinin kural tablosunda değerlendirilmesi sonucu Ağrı Ahmed-i Hani Havalimanı için elde edilen puan

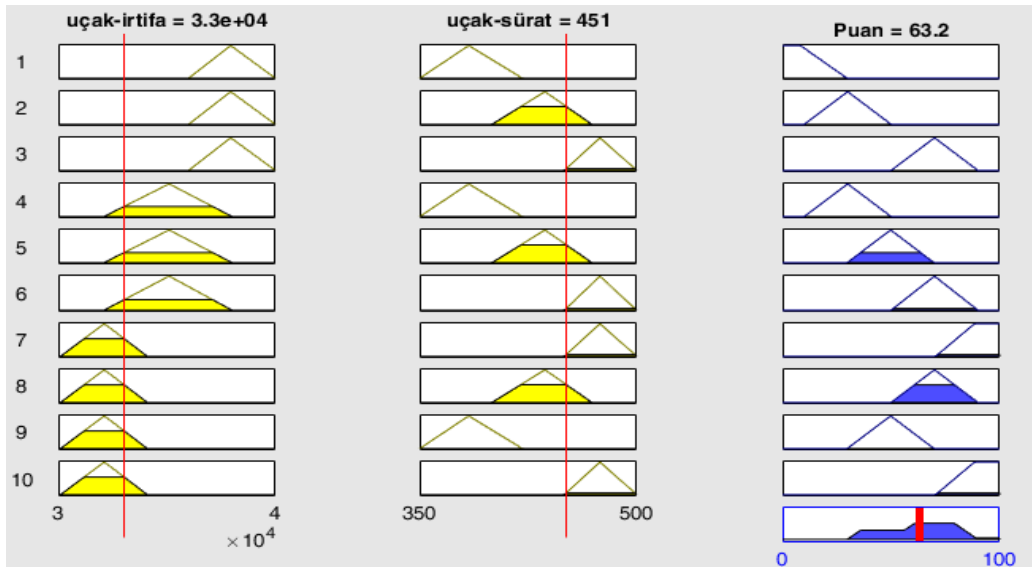
değeri 47.2'dir. Uçağın hızı ve irtifasına göre yapılan 2. değerlendirmede ise 63.2 puan elde edilmiş olup, Şekil 12'de verilmiştir.

Iğdır Şehit Bülent Aydın Havalimanı için uçuş sayısı- DH girişlerinden 30.9 puan değeri elde edilmiş olup, Şekil 13’de verilmiştir. Uçağın hızı ve

irtifası girdilerinin kural tablosunda değerlendirilmesinin sonucunda ise 41.8 puan değeri elde edilmiş olup, Şekil 14’de gösterilmiştir.



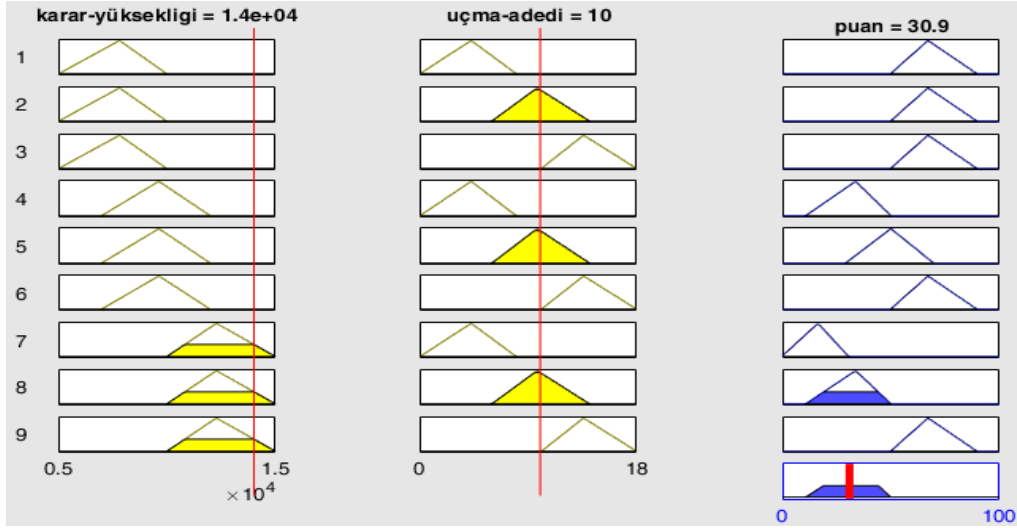
Şekil 11. Ağrı Ahmed-i Hani Havalimanı için uçuş sayısının ve DH'nin kullanıldığı birinci çıkış puan tablosu



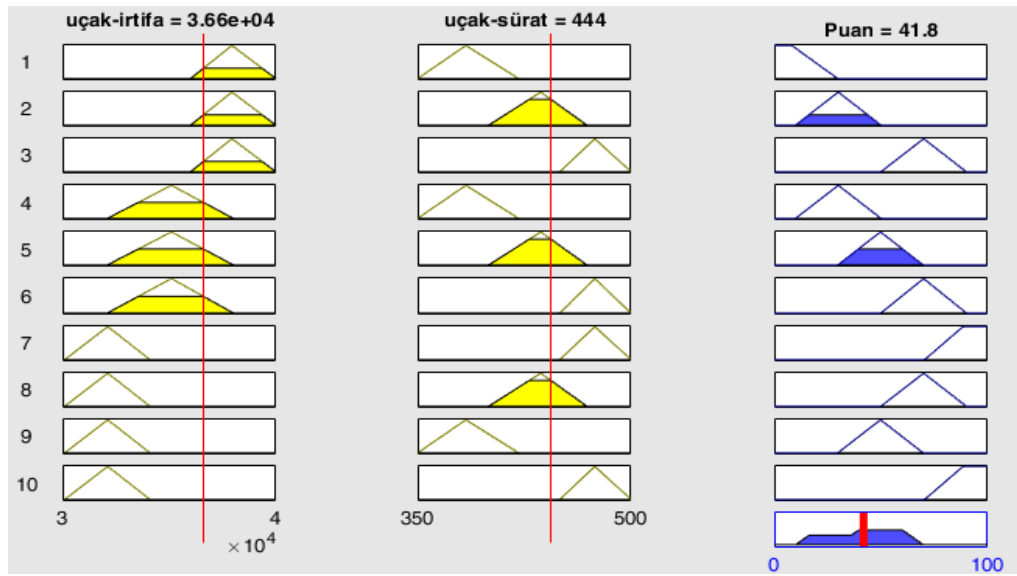
Şekil 12. Ağrı Ahmed-i Hani Havalimanı için uçağın hızının ve irtifasının kullanıldığı ikinci çıkış puan tablosu

Kars, Ağrı ve Iğdır’da bulunan havalimanlarına yapılan uçuş sayısı-karar yüksekliği ve uçağın hızı-irtifası parametreleri ayrı ayrı FIS’ de değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar, toplu olarak Çizelge 5’de verilmiştir.

Tüm parametreler, eşit değere sahip olduğundan puanların ortalaması alınmış ve toplam çıkış, tek bir sayısal değer olarak elde edilmiştir.



Şekil 13. İğdir Şehit Bülent Aydın Havalimanı için uçuş sayısının ve DH'nin kullanıldığı birinci çıkış puan tablosu



Şekil 14. İğdir Şehit Bülent Aydın Havalimanı için uçağın hızının ve irtifasının kullanıldığı ikinci çıkış puan tablosu

Çizelge 5. Havalimanı puan tablosu

	Kars	Ağrı	İğdir
<b>Uçuş sayısı-DH</b>	55.2	47.2	30.9
<b>İrtifa-Hız</b>	68	63.2	41.8
<b>Ortalama</b>	<b>61.6</b>	<b>55.2</b>	<b>36.35</b>

## 5. SONUÇLAR

Hava taşımacılığındaki yoğunluğun artmasına bağlı olarak hava trafik kontrolörlerinin de iş yükü artmaktadır. Hava trafik kontrolörlerinin ana görevi, emniyetli ve düzenli bir uçuş trafiği sağlamaktır. Uzak kule merkezi uygulaması ile



hava trafik kontrolörleri, eş zamanlı birden fazla havalimanının kontrolünü sağlamakla sorumlu hale gelmişlerdir. Uzak kule merkezinde havalimanlarına yaklaşmakta olan uçakların bir karar destek sistemi yardımıyla iniş sıralaması oluşturması halinde hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün azalması ve yanlış kararların alınmasının önüne geçilmesi planlanmaktadır.

Bu çalışmada bulanık mantık tabanlı bir model oluşturulmuştur. Girişler, DHMI, AIP ve flight radar verilerinden yararlanılarak havalimanı günlük uçuş sayısı, havalimanı karar yüksekliği (DH), uçak hızı ve uçağın irtifası olarak belirlenerek üyelik fonksiyonları oluşturulmuştur. Havalimanı günlük uçuş sayısı-DH parametreleri ile bir puan elde edilirken; uçak hızı-irtifası parametreleri ile de ayrı bir puan değeri elde edilmiştir. Uçuş sayısı-DH parametrelerinden oluşan birinci uygulama sonucunda Kars'taki havalimanı 55.2, Ağrı'daki 47.2 ve Iğdır'daki 30.9 puan almışlardır. Uçağın hızı ve irtifası parametrelerinden oluşan ikinci uygulama sonucunda ise Kars Harakani Havalimanı 68 puan, Ağrı Ahmed-i Hani Havalimanı 63.2 puan ve Iğdır Şehit Bülent Aydın Havalimanı 41.8 puan almışlardır. Ele alınan bu parametreler eşit önceliğe sahip olup, ortalamaları hesaplanmıştır ve Çizelge 5'te de görüldüğü gibi Kars'daki, Ağrı'daki ve Iğdır'daki havalimanları sırasıyla 61.6, 55.2 ve 36.35 puan elde etmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda uzak kule merkezi tarafından kontrol edilen havalimanlarında eş zamanlı bir yaklaşma olması halinde iniş öncelik sıralaması Kars, Ağrı ve Iğdır şeklinde olacaktır.

Daha önce Almanya Hava Uzay Merkezi ve FAA gibi kuruluşlar uzak kule merkezi uygulaması hakkında birçok çalışma yapmış olmasına rağmen literatürde uzaktan kontrol edilen havalimanlarına incek uçakların iniş sıralamasına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışma sayesinde hava trafik kontrolörleri üzerindeki stres azaltılarak, hava taşımacılığı daha güvenli ve emniyetli bir hal alacaktır. Öte yandan modelde yer alan günlük uçuş sayısı ve DH parametreleri literatürde daha önce kullanılmamış olup, ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır.

İlerleyen çalışmalarda havalimanlarındaki meteorolojik değişimler, havalimanlarına iniş/kalkış yapan uçak tipleri de giriş parametresi olarak kabul edilerek, daha hassas çözümler gerçekleştirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. ICAO, 1984. 9426-AN/924 Air Traffic Services Planning Manual. International Civil Aviation Organization, 411.
2. Frequentis, 2016. Whitepaper: Introduction to Remote Virtual Tower. Air Traffic Management. Frequentis, 24.
3. Cavcar, M., Cavcar, A., 2003. Türkiye Hava Sahası Ticari Hava Taşımacılığı Kazalarına Genel Bakış: 1950-2003. Mühendis ve Makine, 44(518), 21-29.
4. Dönmez, K., 2017. Türk Hava Sahasında Meydana Gelen Ölümcül Uçak Kazalarına İnsan Faktörleri Analiz Ve Sınıflandırma Sisteminin (Hfacs) Uygulanması. The Journal of Academic Social Science Studies, 6(59), 229-253.
5. Yanaz, E., 2017. Ekip Kaynak Yönetimi ve SHELL Model Anlayışının Havayolu İşletmelerinde Uçuş Emniyeti ve Zamanında Kalkış Performansına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, 143.
6. Meltem, A., 2020. Havacılık Kazası ve Pilot Hatası Kavramı Üzerine Bir Değerlendirme. The Journal of Social Science, 4(7), 251-264.
7. Kıyak, E., 2010. Bulanık Mantıkla Uçak İniş Sıralamasının Yapıtırılması. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 4(4), 51-55.
8. Xu, K., Zhang, G., 2011. Dynamic Neuro-Fuzzy Control Design for Civil Aviation Aircraft In Intelligent Landing System. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2359-2363, 07-10 August 2011, Beijing, China.
9. Ören, A., Koçyiğit, Y., 2016. İnsansız Hava Araçları İniş Sıralamasının Bulanık Mantık Modellemesi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(1), 55-66.
10. Kıyak, E., Kahvecioğlu, A., 2003. Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 1(2), 63-72.

11. Sergaki, A., Kalaitzakis, K., 2002. A Fuzzy Knowledge Based Method for Maintenance Planning in A Power System. *Reliability Engineering & System Safety*, 77(1), 19-30.
12. Beringer, D.B., 1999. Performance-Controlled Systems, Fuzzy Logic, and Fly-By-Wire Controls to General Aviation. *Proceedings of The Human Factors and Ergonomics Society 43rd Annual Meeting*, 43(1), 61-65.
13. Iakovou, D., 2002. Fuzzy Control for Helicopter Aviation. University of Twente, Enschede, Hollanda, 77.
14. Bickraj, K., Pamphile, T., Yenilmez, A., Li, M., Tansel, I., 2006. Fuzzy Logic Based Integrated Controller for Unmanned Aerial Vehicles. *Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 25-26 May 2006, Florida.
15. Saray, U., Kıyak, E., 2018. Bulanık Mantık Tabanlı Kabin Basıncı Kontrolü Tasarımı. II. International Scientific and Vocational Studies Congress (BILMES 2018), 1435-1441.
16. Demiryürek, S., Yıldırım, M.T., 2019. Uçuş Veri Kaydedicisi Verilerinden Bulanık Mantık Yöntemi ile İrtifa Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Özel Sayı*, 171-176.
17. Jian, Z., Guihe, H., Jing, Z., 2013. Cabin Temperature Control System Simulation of Transportation Aircraft. 2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 1689-1692, 21-23 September 2013, Shenyang, China.
18. Meyer, D., Sági, B., Tarnai, G., 2008. Safety Management of Traffic Growth in Air Transportation. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 36, 69-72.
19. Konar, M., 2019. Redesign of Morphing UAV's Winglet Using DS Algorithm Based ANFIS Model. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(9), 1214-1222.
20. Bagis, A., Konar, M., 2018. ABC and DE Algorithms Based Fuzzy Modeling of Flight Data for Speed and Fuel Computation. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 11(1), 790-802.
21. Zadeh, L., 2023. *A Fuzzy Logic. Granular, Fuzzy and Soft Computing*. Springer, New York, U.S, 19-49.
22. Kosko, B., Isaka, S., 1993. Fuzzy Logic. *Scientific American*, 269(1), 76-81.
23. Kaur, A., Kaur, A., 2012. Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(2), 323-325.
24. Taşkırđı, Ö., Ünver, H.M., 2020. Yüksek Başarım için Bulanık Mantık Tabanlı Kişiyel Özel Sınav Üretim Sistemi Tasarımı. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 745-752.
25. Yılmaz, M., Arslan, E., 2005. Bulanık Mantığın Jeodezik Problemlerin Çözümünde Kullanılması. 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 512-522, 23-25 Kasım 2005, İTÜ, İstanbul.
26. Jonsson, R., Daniel T., 2017. Remote Tower Center-Planning Tool. Degree Project, Linnaeus University, Växjö, İsveç, 70.
27. Konar, M., 2010. Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Uçuş Kontrol Sistemlerine Ait Bazı Parametrelerin Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 80.
28. DHMİ, <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatiistikler.aspx>, Erişim tarihi: 01.12.2023.
29. DHMİ-AIP, <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/aipturkey.aspx>, Erişim tarihi: 01.12.2023.
30. Flightradar, <https://www.flightradar24.com/39.74,40.83/7>, Erişim tarihi: 18.06.2023.
31. Havaalanı Emniyet Standartları Talimatı, <https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/taslaklar/SHT-HES.pdf>, Erişim tarihi: 01.12.2023.

## İlgın Linyit Kömürünün Yağ Aglomerasyonunun Ultrasonik Proses ile İyileştirilmesi

Kiraz EŞMELİ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-5699-5199

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya

Geliş tarihi: 05.03.2024

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: EŞMELİ, K., (2024). İlgın Linyit Kömürünün Yağ Aglomerasyonunun Ultrasonik Proses ile İyileştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 107-117.

### Öz

Bu çalışmada, ultrasonik sistemin ılgın linyit kömürünün yağ aglomerasyonu üzerine etkisi incelenmiştir. Ultrasonik cihazının uygulanma güç değerleri ve süresinin kömür süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir verim değerleri üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Bu bağlamda ultrasonik sistemin güç değerinin artması kül değerleri üzerinde olumlu bir etki yaratırken, yanabilir verim değerlerini ise negatif yönde etkilemiştir. Kül içeriğindeki azalma ultrasonik cihazın kavitasyon etkisine bağlanırken, yanabilir verimdeki azalma ultrasonik cihazın kömür yüzeylerinde yarattığı değişime bağlanmıştır. Ayrıca, ultrasonik cihazın belirli bir sürelerde uygulanması (1-3 dakika) kül içeriğini azaltmış, yanabilir verim değerlerini artırmıştır. En iyi sonuçlar ultrasonik işlemin 90 Watt güç değerinde ve 3 dakika uygulanma süresi ile elde edilmiştir. Optimum koşullar altında, geleneksel deneylerde %55,59 verimlilikle %18,39 kül içeriğine sahip kömür elde edilirken, ultrason ön işlemeyle %10,02 kül içeriğine sahip kömür %64,59 verimlilikle elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ultrasonik ön işlemin ince taneli kömürün zenginleştirilmesinde etkili bir yöntem olabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Linyit, Ultrasonik işlem, Yağ aglomerasyonu

### Improvement of Oil Agglomeration of İlgın Lignite Coal by Ultrasonic Process

#### Abstract

In this study, the effect of the ultrasonic system on the oil agglomeration of lignite coal in the presence of waste sunflower oil was investigated. The effect of the power values and application time of the ultrasonic device on the ash content and combustible yield values of the coal suspension was determined. In this context, increasing the power value of the ultrasonic system had a positive effect on the ash values while negatively affecting the combustible yield values. The decrease in ash content was attributed to the cavitation effect of the ultrasonic device, while the decrease in combustible yield was attributed to changes in coal surfaces caused by the ultrasonic device, especially in terms of particle size. Additionally, applying the ultrasonic device for specific durations (1-3 min.) reduced the ash content and increased the combustible yield values. The best results were obtained with 90-Watt power value of ultrasonic process and 3 min.

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Kiraz EŞMELİ, [kubragkelleci@gmail.com](mailto:kubragkelleci@gmail.com)

application time. Under optimal conditions, coal with an ash content of 18.39% was obtained with an efficiency of 55.59% in conventional experiments, while coal with an ash content of 10,02% with ultrasound pretreatment was obtained with an efficiency of 64.59%. These results showed that ultrasound pretreatment was an effective method for the enrichment of fine particle coal.

**Keywords:** Lignite, Ultrasound process, Oil agglomeration

## 1. GİRİŞ

Artan enerji ihtiyacını karşılamak için çok uzun süredir kullanılan ve büyük rezervlere sahip olan kömür dünyada önemli bir konuma sahiptir. Son yıllarda giderek artan enerji talebinin neden olduğu çevre kirliliği insanlar için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Temiz bir çevre için gerekli olan, ince kömürleri geri kazanarak kömür bulamaçlarını azaltabilecek teknikleri benimseyerek kömür atığı üretimini en aza indirmek ve ayrıca kömür zenginleştirilmesi yoluyla uçucu kül üretimini azaltmaktır. Köpük flotasyonu, flokülasyon ve yağ aglomerasyonu gibi ayrılma teknikleri, ince kömür zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler arasındadır [1]. Yağ aglomerasyonu, uygun seçicilik sağlaması ve yüksek kül içerikli ayrılması zor ince kömürlerin zenginleştirilmesinde kullanılması açısından en etkili yöntemlerden biridir [2].

Minerallerdeki organik ve inorganik safsızlıkları ayırma yöntemlerinden biri, yağ aglomerasyonu işlemidir. Sistem, yağ, ince boyutlu mineraller ve su karışımından oluşur. Yağ, hidrofobik özelliklere sahip mineral partiküller için bağlayıcı bir sıvı ortam oluştururken, hidrofilik özelliklere sahip mineraller için de ayırıcı bir ortam oluşturur. Sistemde yağ, mineral parçacıklar arasında bir köprü görevi görür. Karıştırma işlemi başladığında parçacıklar birbiriyle temas eder, minerallerin organik kısmı yağ yapışır ve inorganik mineral maddeler süspansiyon ortamında kalır [3-5]. Başarılı aglomerasyon işlemi, kullanılacak yağın türüne ve miktarına, ayrıca nem içeriğine, partikül boyutuna ve kömürün doğasına bağlıdır. Düşük kalorili kömürler düşük hidrofobik özelliğe sahip olduğundan kullanılacak yağ seçimi özel ve düzenli bir çalışma gerektirir. Literatürde kömür yağ aglomerasyonu için en uygun koşulları belirlemeye

yönelik birçok çalışma bulunmaktadır [6,7]. Bununla birlikte, işlem verimliliği ve uygulanabilirlik açısından, en uygun parametrelerin ve koşulların belirlenmesi gerekmektedir [8-10]. Mazot, gazyağı ve atık yağ gibi çeşitli yağlar kömür yağ aglomerasyonu işlemlerinde kullanılmaktadır. Yağların yüksek maliyeti, yağ aglomerasyon sürecinin endüstride uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için atık yağlar kullanılarak aglomerasyon sürecinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca atık motor yağı kullanılarak yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [10-12].

Kavitasyon, ultrasonik ses dalgalarının bir sıvı ortamda yarattığı etkidir. Mikro kabarcıklar, ses dalgalarının nadir döngüsünde büyüyerek, sıkıştırma döngüsünde ise hızla çökerler. Bu çökme sırasında büyük bir enerji açığa çıkar ve kavitasyon olarak adlandırılan lokalize bir enerji patlaması meydana gelir [13-16]. Ultrasonik işlem, kavitasyon etkisi sayesinde uygulama alanına bağlı olarak malzemelerin temizliği, reaksiyon hızı ve karışım homojenliği gibi faktörleri iyileştirir. Bu nedenle, ultrasonik ses dalgalarının kavitasyon özelliği, bu teknolojinin yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Ultrasonik prosesin, son yıllarda kömür flotasyonu üzerindeki etkisi üzerine yapılan çalışmalar, daha verimli ve etkili flotasyon yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [16-30]. Bu çalışmaların birçoğu, ultrasonik işlemin nano kabarcıkların oluşumu ve mineral-yüzey etkileşimlerini artırması nedeniyle kömürün yüzdürme performansını artırdığını göstermektedir [27-33]. Ayrıca, ultrasonik prosesin reaktiflerin homojen dağılımını sağladığı ve partikül yüzeylerini temizleyerek reaktif tüketimini azalttığı da belirtilmektedir. Ancak, kömür aglomerasyonu üzerine ultrasonik işlemin etkisini araştıran çalışmaları hala sınırlıdır ve daha fazla araştırmaya

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, ultrasonik işlemin kömür aglomerasyonu üzerindeki etkisini daha ayrıntılı bir şekilde incelemektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyel çalışmalarda Konya'nın Ilgın ilçesinden tedarik edilen linyit numunesi kullanılmıştır. Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Nem analizi, ASTM D 3173-03 2010 Standart Test Metoduna göre yapılmıştır [34]. Kül analizi, ASTM D 3174-04 2010 Standart Test Metoduna göre gerçekleştirilmiştir [35]. Kömürün kalorifik değeri tayini standartlara uygun olarak Leco AC-350 marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir [36]. Kömür örneklerinin sabit karbon içerikleri ise; nem, kül ve uçucu madde içerikleri toplamının 100'den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Linyit numunesi çubuk değirmen kullanılarak öğütülmüş numunenin partikül boyut analizi bir lazer kırınım ölçer cihazı (Malvern Mastersizer 2000, UK) ile yapılmıştır. Köprülleme sıvısı olarak testlerde kullanılan atık Ayçiçek yağı okul mutfağından tedarik edildi ve atık yağın yoğunluğu 0,91 g/cm<sup>3</sup> olarak bulundu. Literatürde atık Ayçiçek yağlarının yoğunluğunun 0,9-0,92 g/cm<sup>3</sup>, viskozitesinin ise 14,9-145,2 mm<sup>2</sup>/s arasında değiştiği belirtilmektedir [37,38].

**Çizelge 1.** Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri

Kül (%)	Nem (%)	Sabit Karbon (%)	Kalori Değeri (kcal/kg)
26,02	22,5	16,6	3367,7

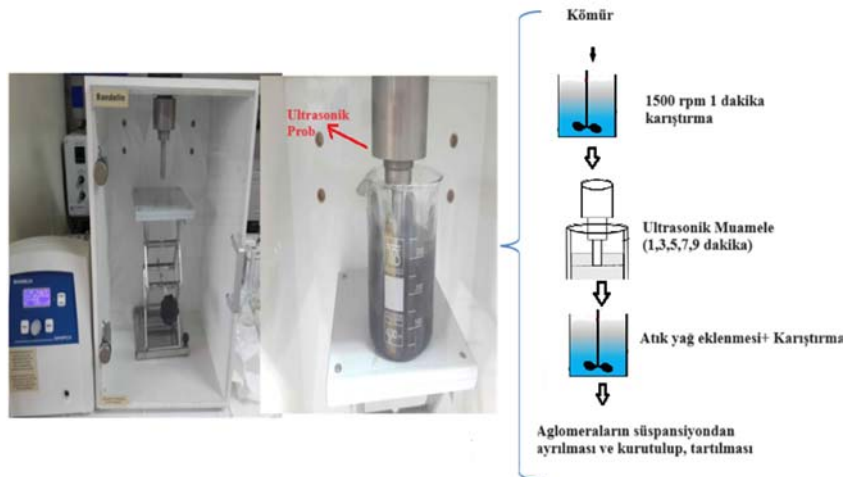
### 2.1. Aglomerasyon Deneyleri ve Ultrasonik Destekli Aglomerasyon İşlemi

Agglomerasyon testleri, 4 adet bariyere sahip cam silindirik bir beherde gerçekleştirilmiştir. Çarpışma olasılığının artırılması için beherin iç yüzeylerine birbirine eşit mesafede olacak şekilde 4 adet cam bariyer yapılandırılmıştır. Deneyel çalışmalar 5 gr kömür 300 cm<sup>3</sup> su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyel prosedür Şekil 1'de sunulmuştur. Aglomereler elde edildikten sonra yanma verimi Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Aglomerasyon deneyleri ±%5 deneyel hata değerleri içinde elde edilmiştir.

Yanabilir Kömür verimi (YV, %)

$$= 100 \times \frac{A(100 - A_{\text{Kül}})}{B(100 - B_{\text{Kül}})} \quad (1)$$

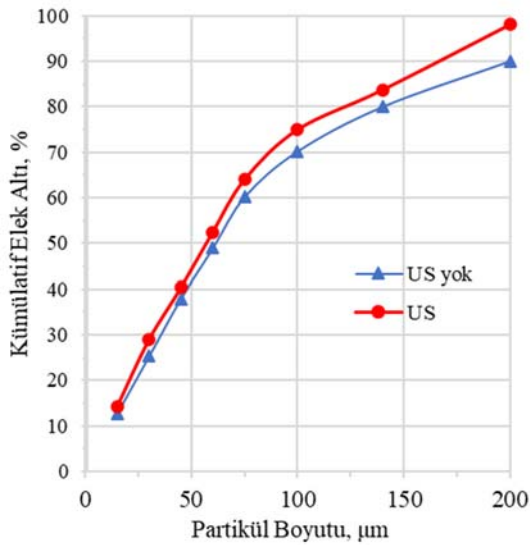
Burada, A= Temiz kömür yüzdesi (%), A<sub>Kül</sub> = temiz kömür kül içeriği, (%) B= besleme malı yüzdesi (%), ve B<sub>Kül</sub> = besleme malı kül içeriği (%)



**Şekil 1.** Ultrasonik titreşim cihazı Bandelin (Sonopuls HD 3200) ve deneysel akım şeması

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

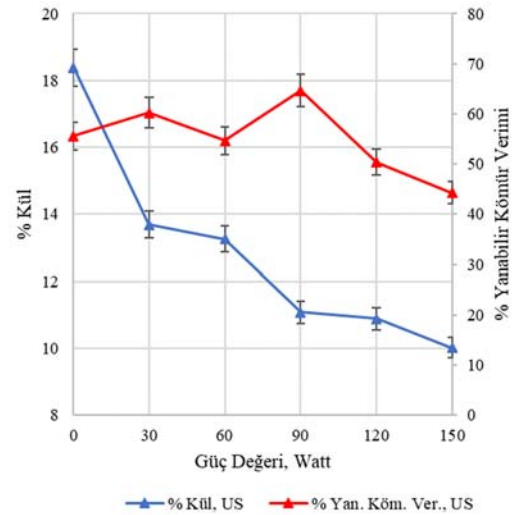
Öğütülmüş numunenin partikül boyut dağılımı Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’den görülebileceği gibi, orijinal kömürün %80’i yaklaşık 148 µm boyutundan geçmektedir. Partikül boyut dağılımı ultrasonik işlemden etkilenmiş ve  $d_{80}$  değeri yaklaşık 120 µm olarak kaydedilmiştir. Toraman [39] tarafından yapılan çalışmada da ultrasonik işlemin kalsit mineralinin partikül boyutunu küçülttüğü belirtilmiştir. Bazı flotasyon çalışmalarında ultrasonik işleminin kaviteasyonun etkisiyle kömür yüzeylerini değiştirdiği, yüzey değişikliğinin partikül-reaktif ve kabarcık-partikül etkileşimini artırarak flotasyon verimliliğinde artışa neden olduğu kaydedilmiştir [28,30,40].



Şekil 2. Öğütülmüş numunenin tane boyut dağılımı

Ultrasonik işlemin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonuna etkisi, Şekil 3’te farklı güç değerlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Ultrasonik işlemin güç değerlerinin 30 watt değerinden 150 Watt güç değerine kadar artması kömür süspansiyonunun kül içeriğini olumlu etkilerken yanabilir verimde azalmaya neden olmuştur. Benzer bulgular Şahinoğlu ve Uslu [41] tarafından yapılan ultrasonik ön işlem kullanılan kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu çalışmasında da bulunmuştur. Bu çalışmada ultrasonik işlemin yüksek güç değerinde kullanılmasının kül

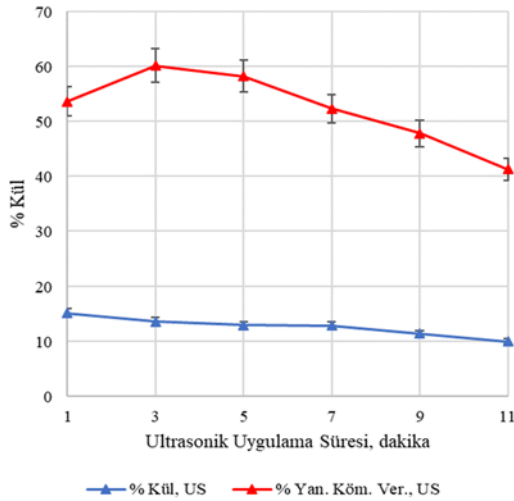
uzaklaştırma oranını artırırken, yanabilir verimi azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ultrasonik sistemin güç seviyelerinin yanabilir kömür verimi üzerindeki olumsuz etkisini kaviteasyon sonucu oluşan küçük boyutlu yağ damlacıklarının aglomerasyonun sınırlı büyümesine yol açmasına bağlamışlardır. Eşmeli [12] tarafından yapılan atık motor yağı ile kömür aglomerasyon çalışmasında da benzer bulgular kaydedilmiş, yüksek güç değerinde ultrasonik ön işlem uygulanmasının kömür süspansiyonunun kül içeriğini azaltırken, yanabilir verim de de azalmaya yol açtığı kaydedilmiştir. Yüksek ultrasonik güç değerinde yanabilir verimdeki azalma, dağılma kuvvetlerinin iyileştirilmesinin bir sonucu olarak kömür parçacıkları ve yağ damlacıkları arasındaki temasın artmasına da bağlı olabilir.



Şekil 3. Ultrasonik işlemin güç değerlerine bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir verim değerleri (ultrasonik işlem süresi: 3 dak.; atık yağ oranı: %20)

Ultrasonik işlem uygulama süresinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 4’de gösterilmiştir. Ultrasonik sistemin uygulanma süresi arttıkça kül içeriği azalmıştır. Öte yandan, 3 dakika boyunca ultrasonik işlem uygulanması, yanabilir kömür veriminde artışa neden olmuştur. Ancak, uygulama sürelerinin 3 dakikadan 11 dakikaya uzaması yanabilir verimi

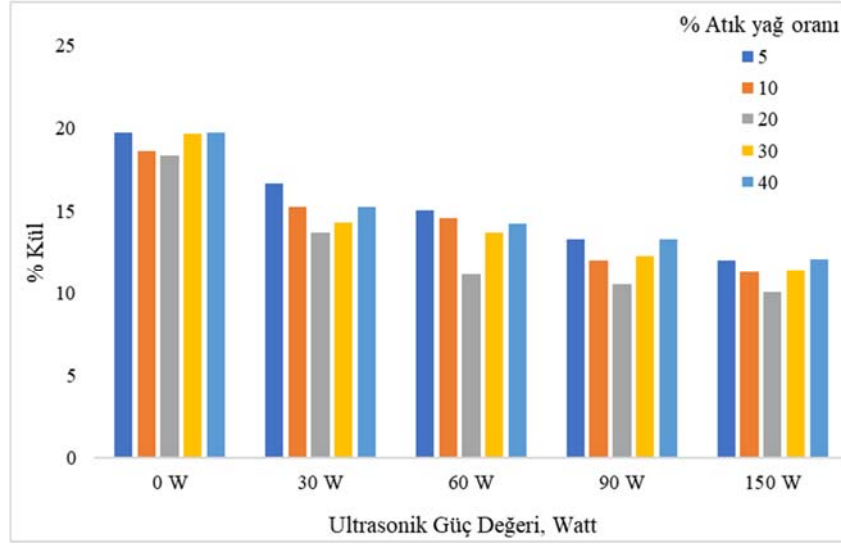
olumsuz yönde etkilemiştir. Şahinoğlu ve Uslu [41], ultrasonik işlem süresinin düşük güç değerinde kül uzaklaştırma oranı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını, fakat güç değerinin yüksek seviyelere çıkmasıyla kül uzaklaştırma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada Şahinoğlu ve Uslu [42], ultrasonik sistemin olumsuz etkisini ultrasonik kavitasyon sonucuyla oluşan nano boyutlu yağ damlacıklarının aglomeraların sınırlı büyümesine izin vermesine bağlamışlar ve bunun da yanabilir verimde azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir. Literatürde ultrasonik işlemin mineral flotasyonu üzerindeki etkisini araştıran çalışmalarda da ultrasonik sistemin uygulanma güç değeri ve süresinin flotasyon başarısını etkileyen önemli parametreler olduğu not edilmiştir [27,43,44].



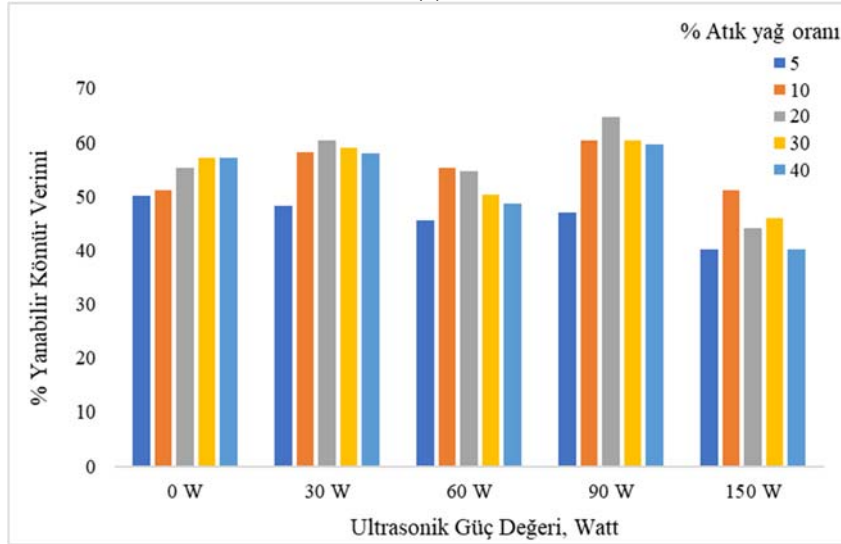
**Şekil 4.** Ultrasonik sistemin farklı muamele sürelerine bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir verim değerleri (Ultrasonik güç değeri: 90 Watt; atık yağ oranı: %20)

Atık yağ oranına bağlı olarak ultrasonik sistemin farklı güç değerleri için kömür süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir verim değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5'te sunulmuştur. Ultrasonik sistemin kullanılmadığı deneylerde %20 atık yağ oranına kadar kül içeriği değerleri azalmış, atık yağ oranının yükselmesiyle kül içeriği değerleri artmaya başlamıştır. Öte yandan, ultrasonik işlemin

kullanıldığı deneylerde de kül içeriği değerlerinin benzer şekilde değiştiği görülmektedir. Ancak, ultrasonik işlemin kül içeriği değerlerini olumlu yönde etkilediği güç değerleri arttıkça daha düşük kül içeriği değerleri elde edildiği görülmüştür. Ultrasonik güç değerlerinin artması, kömürden kül uzaklaştırma oranlarını arttırmaktadır. Şahinoğlu ve Uslu'nun [41] çalışmada, 9.5-72.8 Watt/cm<sup>2</sup> arasındaki ultrasonik güç değerlerinin kullanıldığı durumlarda, kül uzaklaştırma oranlarının arttığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ultrasonik işlem uygulanan numunenin morfolojik analizi yapılmış ve kömür yüzeyinde bulunan çatlak ve kırıkların ultrasonik muameleden sonra azaldığı kömür yüzeyinden kil ve diğer mineral maddelerin uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, ultrasonik işlemin kavitasyon etkisiyle kömür yüzey üzerindeki oksitlenmiş tabakayı azalttığı ve daha temiz kömür yüzeyleri ve boşlukları oluşturduğu düşünülmüştür. Bu sonuçlar, daha yüksek ultrasonik güç değerlerinin daha etkili kül uzaklaştırma sağladığını göstermektedir. Flotasyon çalışmalarında verimlilikteki artışın da kömür yüzeyindeki oksitlenmiş tabakanın azalması ve daha temiz kömür yüzeyleri ve boşluklarının oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir [14,20,21,45]. Ayrıca, ultrasonik kavitasyonun su ve yağ arasındaki arayüzey gerilimini azaltarak yağ damlacıklarını küçük ve kararlı hale getirdiği ve aglomerasyon sürecini iyileştirdiği düşünülmüştür [37,43,44]. Öte yandan, ultrasonik sistemin kullanılmadığı deneylerde, atık yağ oranına bağlı olarak yanabilir kömür verim değerleri artarken, ultrasonik sistemin kullanıldığı deneylerde, özellikle yüksek güç değerlerinde yanabilir verim değerleri azalmaktadır. Amedkar ve arkadaşları [48], Özkan [45] ve Eşmeli [47] çalışmalarında, kömürün ultrasonik işlem sonucunda parçalanmasıyla tane boyutunun azaldığı ve bu durumun aglomerasyonun azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Kang ve arkadaşları [49] tarafından yapılan çalışmada da ultrasonik işlemin kömürün iç yapısında değişikliklere neden olduğunu ve bu değişikliklerin aglomerasyonu azalttığını kaydetmişlerdir. Kömür tane boyutunun aglomerasyonu etkileyen önemli parametrelerden olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır [45,50-53].



(a)



(b)

**Şekil 5.** Atık yağ oranına bağlı olarak ultrasonik sistemin güç değerlerinin a) % kül üzerine etkisi ve b) % yanabilir kömür verimine etkisi (Ultrasonik işlem süresi: 3 dak.)

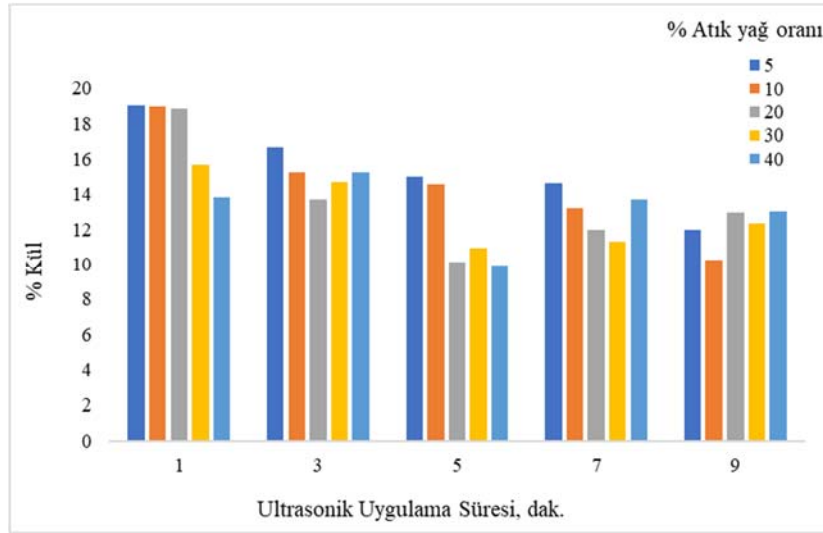
Şekil 6'da atık yağ oranına bağlı olarak ultrasonik işlem sürelerinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi incelenmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, linyit süspansiyonunun kül içeriği 1 dakika ultrasonik işlem uygulandığında %20 atık yağ oranına kadar kısmen azalmış, yağ oranının daha yüksek seviyelere çıkmasıyla keskin bir şekilde azalmıştır. Ancak, diğer sürelerde

ultrasonik işlem uygulandığında kül içeriği % 20 yağ oranına kadar azalmış ve daha sonra artmıştır. Bu durum, ultrasonik işlemin kömür yüzeyindeki güçlü kaviteasyon etkisi nedeniyle olabilir. Yanabilir kömür verimi ise 1 ve 3 dakika ultrasonik işlem süreleri uygulandığında, %20 yağ oranına kadar artmış ve daha sonra yağ oranının yüksek seviyelere çıkmasıyla azalmaya başlamıştır. Ancak, kömür

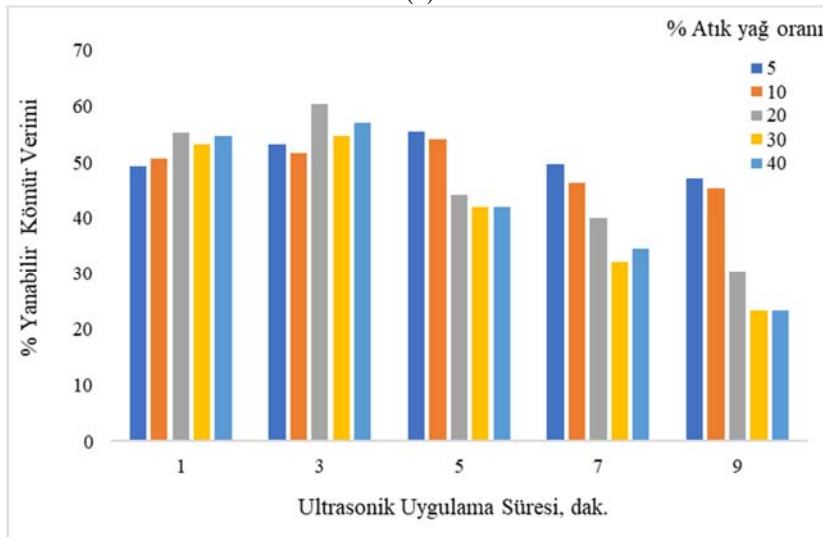


süspansiyonunun ultrasonik işleme daha uzun maruz kalması yanabilir kömür verimini olumsuz yönde etkilemiştir. Xu ve arkadaşları [29] tarafından yapılan bir çalışmada, ultrasona maruz

kalma süresine bağlı olarak oksitlenmiş kömür yüzeyinin daha pürüzsüz hale geldiği, ancak maruz kalma süresinin daha fazla artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir. [45,50-53].



(a)



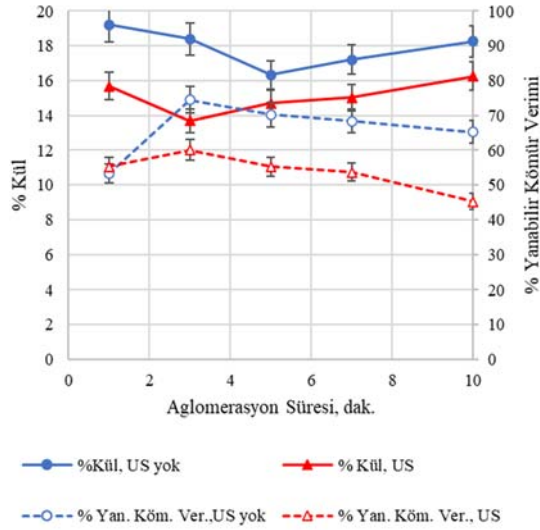
(b)

**Şekil 6.** Yağ oranına bağlı olarak kömür süspansiyonunun ultrasonik işleme maruz kalma süresinin a) % kül üzerine etkisi ve b) % yanabilir kömür verimine etkisi (Ultrasonik sistem güç değeri: 90 watt)

Aglomerasyon süresinin kömürün kül içeriği ve yanabilir kömür verimine etkisi Şekil 7’de incelenmiş ve daha uzun aglomerasyon sürelerinde yanabilir kömür veriminin azaldığı görülmüştür.

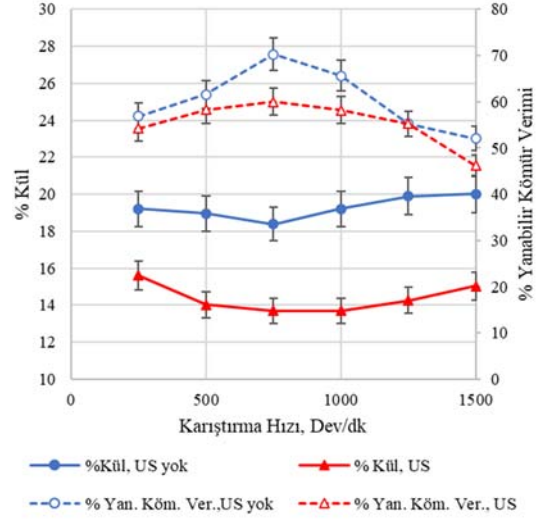
Ultrasonik işlemin kullanıldığı deneylerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir, ancak ultrasonik işlemin kül içeriği değerlerini klasik deneylere göre daha fazla azaltırken, yanabilir kömür verim

değerlerini de azalttığı kaydedilmiştir. Sonuç olarak, kül içeriği ve yanabilir kömür verimi için optimal değerler 3 dakika aglomerasyon süresi ile elde edilmiştir.



**Şekil 7.** Farklı aglomerasyon sürelerinin linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verim değerleri üzerindeki etkisi (Atık yağ oranı: %20; Ultrasonik güç değeri: 90 Watt; Ultrasonik işlem süresi : 3 dak.)

Şekil 8, karıştırma hızına bağlı olarak ultrasonik işlem kullanımının kömürün yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisinin sonuçlarını açıklamaktadır. Ultrasonik işlem kullanılmadan yapılan deneylerde, 750 Dev/dk karıştırma hızına kadar kül içeriği değerleri azalırken aynı zamanda yanabilir verim değerleri de artmıştır. Ancak 750-1500 Dev/dk arasındaki daha yüksek karıştırma hızları, kömür-yağ aglomerelerinin parçalanması ve yanabilir kömür veriminin azalmasıyla sonuçlanmıştır. Literatürde karıştırma hızının kömür -yağ aglomerasyonuna etkisini ortaya koyan birçok çalışmada da benzer bulgular bulunmuştur [54,55]. Ultrasonik işlem uygulanan deneylerde ise, kül içeriği ve yanabilir kömür verim değerleri benzer şekilde değişmekle birlikte klasik deneylere kıyasla daha düşük kül içeriği ve daha düşük verim değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 8.** Farklı karıştırma hızlarına bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir verim değerleri (Atık yağ oranı: % 20; Ultrasonik güç değeri: 90 Watt; Ultrasonik işlem süresi: 3 dak; Aglomerasyon Süresi: 3 dak.)

#### 4. SONUÇLAR

Ultrasonik işlemin güç değerleri ve uygulama süreleri ilgın linyit kömürünün yağ aglomerasyonu üzerinde farklı etkiler yaratmıştır. Ultrasonik işlem uygulanan deneylerde, yüksek güç değerleri ile düşük kül içeriği elde edilirken düşük yanabilir verim değerleri de elde edilmiştir. Ayrıca, kömür süspansiyonunun ultrasonik işleme maruz kalma süresi de kül içeriği ve yanabilir verimde farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. En iyi sonuçlar 3 dakikalık işlem süresinde elde edilmiştir, ancak sürenin uzamasıyla kül içeriği artmaya yanabilir verim de azalmaya başlamıştır. Düşük yağ oranları kömür ince parçacıklarının aglomerasyonu için yetersiz kalırken, yüksek yağ oranları aglomerelerin küresel şeklinin bozulmasına neden olmuş ve yanabilir kömür verimini azaltmıştır. Bu nedenle, çalışılan deneysel koşullarda % 20 atık yağ oranının uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, karıştırma hızı olarak 750 devir/dakika, aglomerasyon için yeterli olmuştur, ancak daha yüksek karıştırma hızları süreci olumsuz etkilemiştir. Sonuç olarak, atık Ayçiçek yağı varlığında ultrasonik muamele ile

26.02% kül içeriğine sahip kömürün kül içeriği ultrasonik işlem uygulanması ile 10.01 % değerine düşürülmüştür. Elde edilen nihai ürünün kalorifik değeri ise 4921 kcal/kg olarak bulunmuştur.

## 5. KAYNAKLAR

1. Gürses, A., Doymuş, K., Bayrakçeken, S., 1996. Selective Oil Agglomeration of Brown Coal: A Systematic Investigation of the Design and Process Variables in the Conditioning Step. *Fuel*, 75(10), 1175-1180.
2. Özer, M., Basha, O.M., Morsi, B., 2017. Coal-Agglomeration Processes: A review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 37(3), 31-167.
3. Keller, Jr.D., Burry, W., 1987. An Investigation of a Separation Process Involving Liquid Water Coal Systems. *Colloids and Surfaces*, 22(1), 37-50.
4. Capes, C., Jonasson, K., 1989. Application of Oil-Water Wetting of Coals in Beneficiation. *Interfacial Phenomena in Coal Technology. Surfactant Science Series*, (1nd ed.), 115-155.
5. Petela, R., Ignasiak, B., Pawlak, W., 1995. Selective Agglomeration of Coal: Analysis of Laboratory Batch Test Results. *Fuel*, 74, 1200-1210.
6. Cebeci, Y., Eroğlu, N., 1998. Determination of Bridging Liquid Type in Oil Agglomeration of Lignite. *Fuel*, 77, 419-424
7. Ünal, İ., Aktaş, Z., 2001. Effect of Various Bridging Liquids on Coal Fines Agglomeration Performance. *Fuel Processing Technology*, 69, 141-55.
8. Alonso, M.I., Valdés, A.F., Martinez-Tarazona, R.M., Garcia, A.B., 2002. Coal Recovery from Fines Cleaning Wastes by Agglomeration with Colza oil: A Contribution to the Environment and Energy Preservation. *Fuel Processing Technology*, 75, 85-95.
9. Cebeci, Y., 2003. Investigation of Kinetics of Agglomerate Growth in Oil Agglomeration Process. *Fuel*, 82, 1645-1651.
10. Yadav, A.M., Suresh, N., Sundaram, A., Painkra, P., Raja, A.K., Arsha, M.D., 2017. Investigation and Optimization of the Recovery of Coal Fines Using Oil Agglomeration Process: Use of Waste Oils from Different Sectors. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(5), 754-764.
11. Yadav, A.M, Singhal, H., Agarwal, D., Suman, S., 2021. Recovery of Energy Values from High-ash Content Washery Tailings Using Waste Oils by Oil Agglomeration. *Separation Science and Technology*, 1-13.
12. Eşmeli, K., 2023. Improvement of Lignite Oil Agglomeration by Ultrasound Process Using Waste Engine Oil. *Particulate Science and Technology*, 41(4), 544-554.
13. Çelik, M.S., 1989. Effect of Ultrasonic Treatment on the Floatability of Coal and Galena. *Separation Science and Technology*, 24 (14), 1159-1166.
14. Özkan, Ş.G., Kuyumcu, H.Z., 2006. Investigation of Mechanism of Ultrasound on Coal Flotation. *International Journal Mineral Processing*, 81(3), 201-203.
15. Özkan, Ş.G., Kuyumcu, H.Z., 2007. Design of a Flotation Cell Equipped with Ultrasound Transducers to Enhance Coal Flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5), 639-645.
16. Farmer, A.D, Collings, A.F, Jameson, G.J. 2000. Effect of Ultrasound on Surface Cleaning of Silica Particles. *Int. J. Miner. Process.*, 60, 101-113.
17. Özkan, Ş.G., Güngören, C., 2012. Enhancement of Colemanite Flotation by Ultrasonic Pre-treatment. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 48, 455-462.
18. Videla, A.R, Morales, R., Saint-Jean, T., Gaete, L., Vargas, Y., Miller, J.D., 2016. Ultrasound Treatment on Tailings to Enhance Copper Flotation Recovery. *Miner. Eng.* 99, 89-95.
19. Ghadyani, A., Noaparast, M., Ziaedin, S., Tonkaboni, S., 2017. A Study on the Effects of Ultrasonic Irradiation as Pretreatment Method on High-ash Coal Flotation and Kinetics a Study on the Effects of Ultrasonic Irradiation as Pretreatment Method on High-ash Coal flotation and Kinetics. *Int J Coal Prep Util*, 38(7), 374-391.

20. Cao, Q., Cheng, J., Feng, Q., Wen, S., Luo, B., 2017. Surface Cleaning and Oxidative Effects of Ultrasonication on the Flotation of Oxidized Pyrite. *Powder Technol.*, 311, 390-397.
21. Peng, Y., Mao, Y., Xia, W., Li, Y., 2018. Ultrasonic Flotation Cleaning of High-ash Lignite and its Mechanism. *Fuel*, 220, 558-566.
22. Mao, Y., Peng, Bu, X., Xie, G., Wu, E., Xia, W., 2018. Effects of Ultrasound on the True Flotation of Lignite and its Entrainment Behavior. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40, 940-950.
23. Güngören, C., Özdemir, O., Wang, X., Özkan, Ş.G., Miller, J., 2019. Effect of Ultrasound on Bubble-Particle Interaction in Quartz-Amine Flotation System. *Ultrason. Sonochem.*, 52, 446-454.
24. Güngören, C., Bakhtarhan, Y., Demir, İ., Özkan, Ş.G., 2020. Enhancement of Galena-Potassium Ethyl Xnhtate Flotation System by Low Power Ultrasound. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 30, 1102-1110.
25. Çilek, E.C, Özgen, S., 2009. Effect of Ultrasound on Separation Selectivity and Efficiency of Flotation. *Miner. Eng.*, 22, 1209-1217.
26. Mao, Y., Bu, X., Peng, Y., Tian, F., Xie, G., 2020. Effects of Simultaneous Ultrasonic Treatment on the Separation Selectivity and Flotation Kinetics of High-ash Lignite. *Fuel*, 259(1), 116270.
27. Altun, N.E, Hwang, J.Y, Hiçyılmaz, C., 2009. Enhancement of Flotation Performance of Oil Shale Cleaning by Ultrasonic Treatment. *Int. J. Miner. Process.*, 91(1-2), 1-13.
28. Özkan, Ş.G., 2012. Effects of Simultaneous Ultrasonic Treatment on Flotation of Hard Coal Slimes. *Fuel*, 93, 576-580.
29. Xu, M., Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Wang, D., Wang, L., 2017. Effect of Ultrasonic Pretreatment on Oxidized Coal Flotation. *Energy Fuels*, 31, 14367-14373.
30. Mao, Y., Xia, W., Peng, Y., Xie, G., 2019a. Ultrasonic-Assisted Flotation of Fine Coal: A Review. *Fuel Process. Technol.*, 195, 106150.
31. Mao, Y., Chen, Y., Bu, X., Xie, G., 2019b. Effects of 20 kHz Ultrasound on Coal Flotation: The Roles of Cavitation and Acoustic Radiation Force. *Fuel*, 256, 115938.
32. Yasuda, K., Matsushima, H., Asakura, Y., 2019. Generation and Reduction of Bulk Nanobubbles by Ultrasonic Irradiation. *Chem Eng. Sci.*, 195, 455-461.
33. Jin, L., Wang, W., Tu, Y., Zhang, K., Lv, Z., 2021. Effect of Ultrasonic Standing Waves on Flotation Bubbles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105459.
34. ASTM D 3173-03, 2010. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, 3.
35. ASTM D 3174-04, 2010. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, 5.
36. ASTM D 5865-10a, 2010. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, 14.
37. Vargas, E.M., Neves, M.C., Tarelho, L.A.C., Nunes, M.I., 2019. Solid Catalysts Obtained from Wastes for Fame Production Using Mixtures of Refined Palm Oil and Waste Cooking Oils. *Renewable Energy*, 136, 873-883.
38. Shen, M., 1999. Development and Scale-up of Particle Agglomeration Processes for Coal Beneficiation. PhD. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 167
39. Toraman, Ö.Y., 2017. Experimental Investigations of Preparation of Calcite Particles by Ultrasonic Treatment. *Physicochem Prob. Miner. Process.*, 53, 859-68.
40. Barma, S.D., 2019. Ultrasonic-assisted coal beneficiation: A Review. *Ultrason. Sonochem.* 50, 15-35.
41. Şahinoglu, E., Uslu, T., 2013a. Increasing Coal Quality by Oil Agglomeration After Ultrasonic Treatment. *Fuel Processing Technology*, 116, 332-338.
42. Şahinoglu, E., Uslu, T., 2013b. Use of Ultrasonic Emulsification in Oil Agglomeration for Coal Cleaning. *Fuel*, 113.
43. Chen, Y., Truong, V.N.T, Bu, X, Xie G., 2020. A Review of Effects and Applications of Ultrasound in Mineral Flotation. *Ultrason. Sonochem.*, 60, 104739.
44. Hassanzadeh, A., Sajjady, S.A., Gholami, H., Amini, S., Özkan, Ş.G., 2020. An Improvement

- on Selective Separation by Applying Ultrasound to Rougher and Re-cleaner Stages of Copper Flotation. *Minerals*, 10(7), 619.
45. Özkan, Ş.G., 2017. Further Investigations on Simultaneous Ultrasonic Coal Flotation. *Minerals*, 7(10), 177.
  46. De Castro, M.L., Priego-Capote, F., 2007. Ultrasound-Assisted Crystallization (Sonocrystallization). *Ultrason. Sonochem*, 14, 717-724.
  47. Eşmeli, K., 2023. The Effect of Ultrasound Treatment on Oil Agglomeration of Barite. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 44(3), 189-200
  48. Ambedkar, B., Chintala, T.N., Nagarajan, R., Jayanti, S., 2011a. Feasibility of Using Ultrasound Assisted Process for Sulfur and Ash Removal from Coal. *Chem. Eng. Process.*, 50(3), 236-246.
  49. Kang, W., Xun, H., Chen, J., 2007. Study of Enhanced Fine Coal De-Sulphurization and De-Ashing by Ultrasonic Flotation. *Journal of China University of Mining and Technology*, 17(3), 358-362.
  50. Yazıcı, E.Y., Deveci, H., Alp, İ., Uslu, T., 2007. Generation of Hydrogen Peroxide and Removal of Cyanide from Solutions Using Ultrasonic Waves. *Desalination*, 216(1-3), 209-221.
  51. Şahinoglu, E., Uslu, T., 2008. Amenability of Muzret Bituminous Coal to Oil Agglomeration. *Energy Convers Manage*, 49, 3684-3690.
  52. Royaei, M.M., Jorjani, E., Chelgani, S.C., 2012. Combination of Microwave and Ultrasonic Irradiations as a Pretreatment Method to Produce Ultraclean Coal. *Int J Coal Prep Util*, 32, 143-155.
  53. Zhang, H.X., Bai, H.J., Dong, X.S., Wang, Z.Z., 2012. Enhanced Dsulfurizing Flotation of Different Size Fractions of High Sulfur Coal using Sono Electrochemical Method. *Fuel Process. Technol.*, 97, 9-14.
  54. Cebeci, Y., Sönmez, İ., 2002. The Investigation of Coal-Pyrite/Lignite Concentration and their Separation in the Artificial Mixture by Oil Agglomeration. *Fuel*, 81, 1139-1146.
  55. Cebeci, Y., Sönmez, İ., 2006. Application of the Box-Wilson Experimental Design Method for the Spherical Oil Agglomeration of Coal. *Fuel*, 85, 289-297.



## The Effect of Riblets on the Aerodynamic Performance of NACA 0018 Airfoil

Emre GÜLER<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7337-8678

Engin PINAR<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-7484-8616

Tahir DURHASAN<sup>\*3</sup> ORCID 0000-0001-5212-9170

<sup>1</sup>Tarsus University, Department of Aerospace Engineering, Tarsus, Türkiye

<sup>2</sup>Çukurova University, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

<sup>3</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Aerospace Engineering, Adana, Türkiye

Geliş tarihi: 12.03.2024

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: GÜLER, E., PINAR, E., DURHASAN, T., (2024). The Effect of Riblets on the Aerodynamic Performance of NACA 0018 Airfoil. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 119-132.

### Abstract

In this numerical study, riblets on the airfoil were utilized to enhance the aerodynamic performance of NACA0018 airfoil. Riblets of identical height and base length are strategically placed on the suction surface of the airfoil with varying spacing ratios along the flow direction ( $x$ ) and chord length ( $c$ ), specifically  $x/c = 0.3$  and  $0.7$ . Four distinct riblet airfoil models are subjected to computational fluid dynamics (CFD) analysis within an angle of attack range from  $0^\circ$  to  $21^\circ$  at a Reynolds number of  $Re=1 \times 10^5$ . The obtained results are systematically compared with the performance of the plain airfoil. Numerical analyses reveal the significant influence of the spacing ratio on flow control and the overall aerodynamic performance of the airfoil, establishing a direct relationship with riblet spacing. The presence of riblet structures is observed to increase the lift coefficient, concurrently delaying the stall angle up to  $19^\circ$ . Notably, the ribbed structures effectively mitigate the interaction between the laminar separation bubble and trailing edge separation, leading to a reduction in turbulent kinetic energy values.

**Keywords:** Riblet, Computational fluid dynamics, Flow control, Aerodynamic performance of airfoil

### Yivlerin NACA 0018 Kanat Profilinin Aerodinamik Performansı Üzerine Etkisi

#### Öz

Bu sayısal çalışmada NACA 0018 kanat profilinin aerodinamik performansını arttırmak için yivli yapılar kullanılmıştır. Aynı yüksekliğe ve taban uzunluğuna sahip olan yivler, akış yönü doğrultusunun ( $x$ ) veter uzunluğuna ( $c$ ) oranı,  $x/c = 0,3$  ve  $0,7$  arası boyunca kanat emme yüzeyine farklı boşluk oranları ile yerleştirilmişlerdir. Dört farklı yivli kanat modeli hücum açısının  $0^\circ$  ile  $21^\circ$  arasında ve Reynolds sayısının  $Re=1 \times 10^5$  değerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile analiz edilmiştir. Yivli yapıların etkisini

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Tahir DURHASAN, [tdurhasan@atu.edu.tr](mailto:tdurhasan@atu.edu.tr)

göstermek için elde edilen sonuçlar yalın kanat modeli ile kıyaslamalı olarak sunulmuştur. Sayısal çözümlerden elde edilen veriler yiv boşluk oranının akış kontrolü üzerinde etkili olduğunu ve kanat aerodinamik performansının yiv boşluk oranı ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Yivli kanat modelinin taşıma katsayısını artırdığını ve tutunma kaybı açısını  $19^\circ$ 'e kadar ötelediği gözlemlenmiştir. Ayrıca yivli yapıların laminar ayrılma kabarcığının ve firar kenarı yarılması etkileşimini bastırdığını böylelikle türbülans kinetik enerji değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yivli yüzey, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Akış kontrolü, Kanat aerodinamik performans

## 1. INTRODUCTION

The interest in studies on the aerodynamic performance of airfoils has increased due to the increasing use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and micro aerial vehicles (MAVs) in both military and civilian areas.

Since flow around the airfoils directly affects aerodynamic performance, it is significant to examine flow structures. Flow types around airfoils can be classified depending on the Reynolds ( $Re$ ) number. If the flow has a Reynolds number less than  $5 \times 10^5$ , it is referred to as low Reynolds number flow. Low Reynolds number flow conditions are common in engineering applications (such as micro-drones and small-scale wind turbines) and in nature (such as birds and insects). The most basic characteristic of low Reynolds number flows is that the laminar boundary layer, which separates from the airfoil due to strong pressure gradients caused by viscous effects, transition laminar to turbulence and reattach to the surface again, forming a laminar separation bubble. The laminar separation bubble causes structural damage through negative effects, such as decrease in lift and increase in drag, as well as mechanical vibration. To control these effects, control of the flow structure around the airfoil has become one of the priority topics for researchers.

One of the mechanisms used to reduce the drag force is to add a roughness element to the airfoil. These surfaces create small vortices, causing the momentum of the flow to increase. Flow separation may be delayed due to an increase in momentum. By making geometrical changes on the surfaces of different airfoils, a general increase in aerodynamic performance has been achieved by delaying the stall. Huber et. al. [1] experimentally investigated

the effect of roughness on the Wortmann FX-63-137 airfoil using wires of different diameter sizes, at angle of attack ( $\alpha$ )  $-16^\circ$  to  $24^\circ$  and Reynolds number,  $Re=1 \times 10^5$ . According to their findings, they revealed that knowing the boundary layer thickness should be the first step for a critical roughness height, and that the change in wire diameter does not increase the aerodynamic performance of the wing in direct proportion. After a certain diameter, this positive effect may reverse due to increase in diameter. They also showed that the stall was prevented depending on the placement of the wire on the wing. Gopalarathnam et. al. [2] conducted both experimental and numerical studies for three different airfoils, SA7024, SA7025, and SA7026. The use of the ramp configuration with the help of trips in different positions on the airfoil's boundary layer was examined in the Reynolds number range of  $1 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^5$ . Even though their findings effectively reduce the drag and increase the lift force, they stated that the need for further studies is required for low Reynolds number airfoils. In the study conducted by Sareen et. al. [3], they aimed to reduce the drag force for different flow regimes and thus, control the flow structure with four different V-shaped riblet structures on the DU 96-W-180 airfoil used for wind turbines. Among the riblet height configurations of 44, 62, 100 and 150  $\mu\text{m}$  used, it was observed that the drag coefficient decreased for the riblet with a height of 62  $\mu\text{m}$ . In addition to wing profiles, the effect of riblets were investigated on different basic geometries, including cavities, cylinders, and others. Lee et. al. [4] performed an experimental study by coating a circular cylinder with a completely riblet film. The height of the V-shaped micro-sized riblets was chosen as 180  $\mu\text{m}$  and the gap between them was 300  $\mu\text{m}$ , and they were placed along the entire surface of the cylinder and



analyzed for different Re numbers. The findings showed that although the drag coefficient decreased by 7.6% at  $Re=3.6 \times 10^3$ , it was increased by approximately 4.2% at  $Re=3.6 \times 10^4$ . Vilkinis et. al. [5] experimentally examined the effect of triangular riblets added into cavity. They found that as a result of decreasing the distance between the riblets placed inside the cavities, the pressure loss increased, and as the size inside the cavity decreased, the interaction between the main flow and the flow in the subcavities decreased, resulting in a decrease in pressure losses. Moreover, we have observed that the use of riblet surface is an effective flow control method for different wing profiles, as it is also effective on wing aerodynamics. Zhang et. al. [6] applied the large eddy simulation to reveal the effect of V-type isosceles-shaped riblets placed on the Eppler E374 airfoil for a constant angle of attack ( $\alpha$ ). The riblets on the airfoil were placed along the chord length (c) ratio between  $x/c=0.3$  and  $x/c=0.99$ , and also the effects of adding a trip on the wing at  $x/c=0.13$  were investigated on the aerodynamic performance of the airfoil. The findings showed that the used methods were effective in increasing the lift coefficient, decreasing the drag coefficient, and reducing the effectiveness of Reynolds stress values and vortex structures. However, one of the important parameters affecting vortex shedding in different geometric structures is the angle of attack [7].

NACA airfoils have been the research subject of many studies due to their widespread use in practice [8-13]. Lee et. al. [14] experimentally examined the effect of the micro-riblet film placed on the suction side of the NACA0012 airfoil. In comparison to the base airfoil, the use of V-shaped riblet grooves resulted in a 6.6% reduction in drag force for the value of  $Re=1.54 \times 10^4$ , whereas it increased by 9.8% at  $Re=4.62 \times 10^4$ . Wu et. al. [15] numerically examined the riblet effect on the NACA0012 airfoil in low Re number flow regimes. The riblets are placed on the airfoil in two different configurations: the middle part, where the chord (c) length ratio ranges from  $x/c=0.3$  to  $x/c=0.7$ , and the trailing edge section, designated with ratios ranging from  $x/c=0.5$  to 0.9. It was observed that the drag coefficient was reduced by 9.65% for the most

effective riblet height of 0.1 mm. Tiainen et. al. [16] experimentally studied the NACA0024 airfoil by creating 30° angle trapezoidal riblet structures with height (h) and spacing (s) of  $h=0.149$  mm and  $s=0.298$  mm, in the Reynolds number range of  $8.3 \times 10^4 < Re < 2.48 \times 10^5$ . The riblets used in the experiments were placed on the airfoil at the position of the chord length ratio between  $x/c=0.65$  and  $x/c=0.9$ , and their quantitative effects on the flow were demonstrated using the Particle Image Velocimetry (PIV) method. According to the findings of the study, a decrease of up to 6.8% in drag force and a decrease of up to 80% in Reynolds stress values were determined. They also revealed that the airfoil with riblets could increase the power coefficient of a horizontal axis wind turbine by 10.9%. Yang et. al. [17] numerically investigated V-type riblet structures on the NACA4412 airfoil for different angles of attack and different riblet lengths in the low Re number flow regime. They determined that the most effective riblet length was 0.8c, and in this case, there was a 17.46% increase in lift force and a 15.04% decrease in drag force. In addition to employing riblets, various studies in the literature explore the application flaps added to the trailing edge of the airfoil for flow control. For instance, Meena et. al. [18] examined the effects on wing aerodynamics by adding Gurney flap on four different airfoils, namely NACA0000 (flat plate), 0006, 0012, and 0018, for low Reynolds number flow regime. In the numerical study conducted for varying angles of attack of the airfoil and different heights of the Gurney flap added to the trailing edge, an almost twofold increase in the lift-to-drag ratio was observed. They determined that the maximum lift-drag ratio was obtained at the Gurney flap height (h) value of  $h/x = 0.1$  for all airfoil profiles. Göv et. al. [19] proposed a flexible airfoil that can be changed during flight instead of making additions to the airfoil. Numerical analyzes conducted within the range of  $Re=5 \times 10^4$  and for angles of attack  $0^\circ \leq \alpha \leq 23^\circ$  indicated that the utilization of modified airfoil shapes in the NACA4412, yielded effective aerodynamic results especially during takeoff and climb phases, delaying stall occurrence at increased angles of attack. The studies mentioned so far have been

carried out by using fixed additions on the airfoil to control the flow structure on the airfoil. Additionally, studies have been conducted on delaying the stall angle in NACA airfoils using different methods such as using flexible [10,20] or flapping [21].

Despite the application of various active or passive control methods, there is a need to investigate and diversify alternative control methods that can be applied across different angles of attack and flow velocities on airfoils. In this study, our aim is to increase the lift coefficient by introducing a rough structure created by placing different riblet structures on the NACA0018 airfoil, and to delay stall for high angles of attack by shifting the boundary layer separation point. Within the scope of this numerical study, the flow structures and aerodynamic coefficients around 4 different controlled airfoils (M1, M2, M3 and M4) are investigated and the results obtained are presented in comparison with the plain airfoil (M0). The position of the riblets on the airfoil is tested at different angles of attack ( $0^\circ \leq \alpha \leq 21^\circ$ ) by varying the ratio of the flow axis (x) and chord length (c) between  $x/c=0.3$  and  $0.7$ . The obtained results showed that the use of riblet structures on the airfoil is an effective method on flow control and it positively affects the aerodynamic performance of the airfoil by increasing the lift-drag ratio and stall angle.

## 2. MATERIALS AND METHODS

In this section, the numerical simulation domain, the geometry of the airfoil, mesh information, riblet shapes, locations and dimensions are explained in detail with the help of the presented figures. In this study, two-dimensional numerical analyzes were carried out at a value of  $1 \times 10^5$  of Reynolds number ( $Re = \rho U_\infty c / \mu$ ) using the ANSYS Fluent, computational fluid dynamics (CFD) program. In the dimensionless Reynolds number formula,  $\rho$  is the density of the fluid,  $U_\infty$  is the free flow velocity,  $c$  is the airfoil chord length and  $\mu$  is the dynamic viscosity of the fluid.

The aerodynamic performances of the airfoils were examined with the lift coefficient ( $C_L$ ) (Equation 1), drag coefficient ( $C_D$ ) (Equation 2) and pressure coefficients ( $C_p$ ) (Equation 3) obtained for different angles of attack.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (1)$$

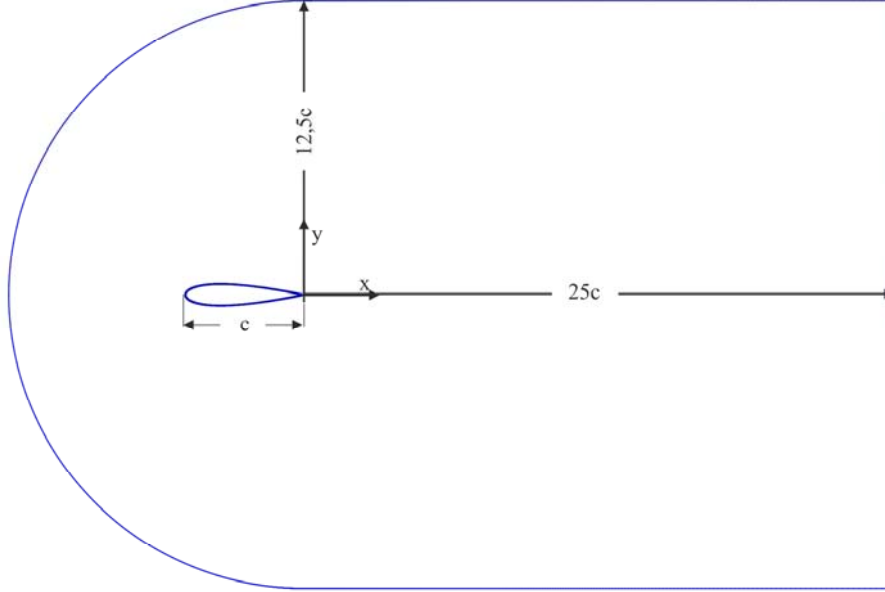
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3)$$

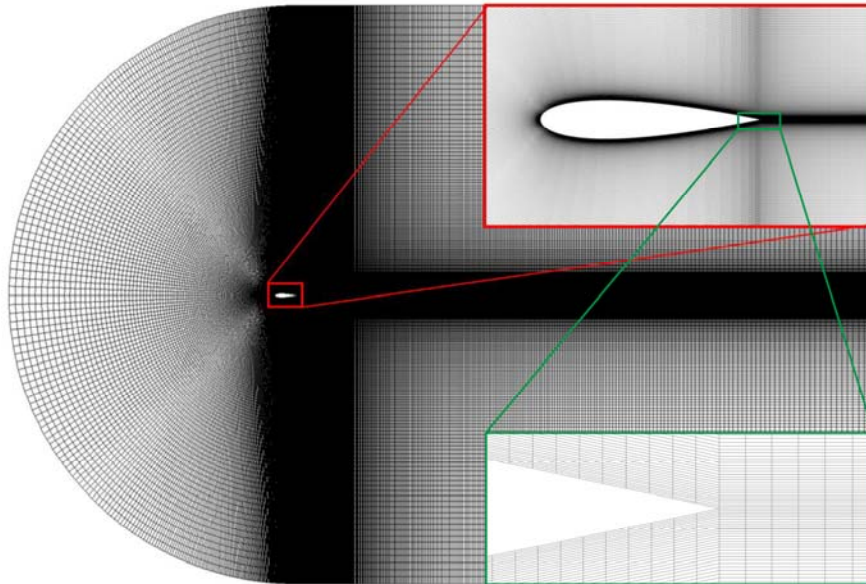
In the formulas given above,  $F_L$  is the lift force,  $F_D$  is the drag force,  $P$  is the static pressure at the point measured on the airfoil,  $P_\infty$  is the static pressure of the free stream,  $\rho$  is the fluid density,  $U_\infty$  is the free flow speed and  $A$  is the airfoil reference area.

### 2.1. Model and Mesh Structure

Within the scope of the study, in order to reveal the effect of riblet, numerical analyzes were first carried out for the NACA 0018 airfoil that does not have a control element. The chord length ( $c$ ) of the airfoil was chosen as 200 mm. The flow field is shown in Figure 1 and the coordinate system is placed on the trailing edge of the airfoil. To prevent possible deterioration of the structure around the airfoil due to wall effects, the flow field was extended by  $12.5c$  on the y-axis and  $25c$  on the x-axis. In particular, a C-type mesh structure was employed to enhance the resolution of the boundary layer on the airfoil. The mesh structure was created in the ICEM CFD program. The mesh structure around the NACA 0018 airfoil is shown in Figure 2. A total of 500,000 mesh cells were created, and the upper and lower surfaces of the airfoil were divided into sections with 350 and 310 nodal points, respectively. Mesh quality is given in Table 1.



**Figure 1.** Schematic view of flow domain



**Figure 2.** Mesh Structure around airfoil

As seen in Figure 1, the mesh structure has been developed to achieve a more precise solution at the boundary layer, with increased density as it approaches the airfoil surface. The mesh structure

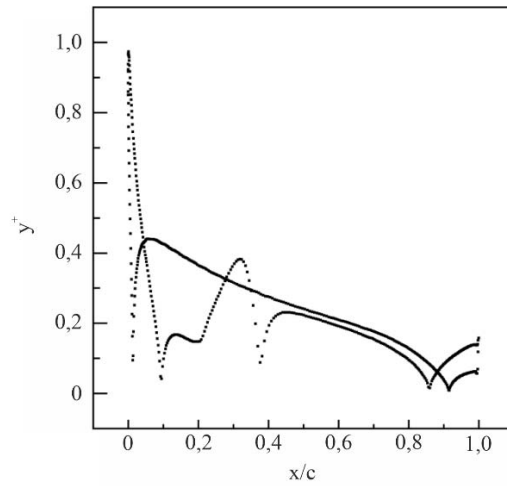
was designed with a  $y^+$  value less than 1, as depicted in Figure 3, and the first layer thickness on the airfoil was determined to be  $2.6 \times 10^{-5}$  m.

**Table 1.** Mesh quality values

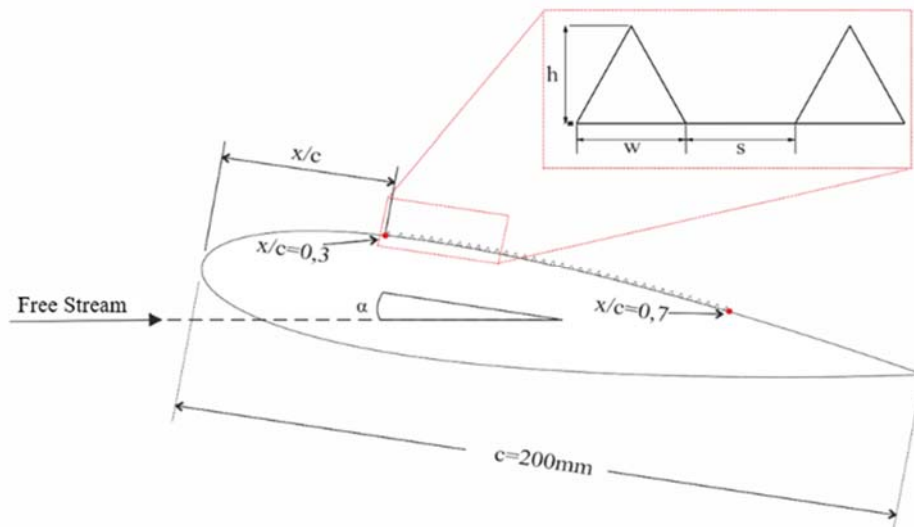
	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Fluent user manual
Skewness quality	$1.3 \times 10^{-10}$	0.13	0.024	0.0390	Max. Skewness < 0.25, Excellent
Orthogonal quality	0.83	1	0.997	0.00555	$0.7 < \text{Min. Orthogonal Quality} < 0.95$ , Very Good

We aimed to increase the aerodynamic performance of the NACA 0018 airfoil by using the riblet control element. The riblet parameters are shown in Figure 2 in detail. Figure 4 shows the riblet height (h), riblet base length (w), and the gap (s) between two riblet base corners. A study was conducted by Wu et. al. [15] on the NACA 0012 airfoil to reduce drag by means of triangular riblets placed on the suction surface. In their study, cavity surfaces were created on the airfoil, cavity dimensions were determined as  $h = s = w$ , and four different values of the gap parameter were examined numerically. Unlike the previous study, in this investigation, the riblets were strategically positioned to induce surface roughness on the suction side of the airfoil. The riblet parameters were chosen as height, position, number of riblets and distance between two riblets. Four different airfoil models were created depending on these parameters, and the dimensionless values of

the parameters according to the chord length of the airfoil are given in Table 2.



**Figure 1.** Distribution of  $y^+$  over airfoil



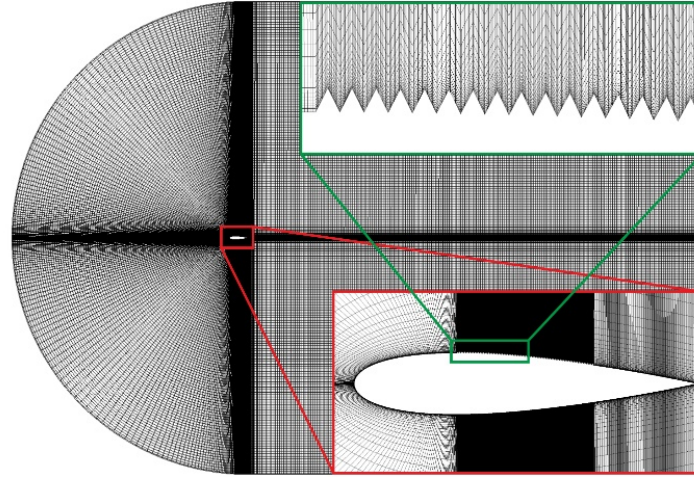
**Figure 2.** Representation of riblets on the airfoil

The airfoil models employed in the study are denoted as M0, M1, M2, M3, and M4. The M0 model represents the plain NACA 0018 airfoil and serves as a reference to elucidate the impact of the riblet. In all models, the riblets are placed on the suction surface of the airfoil and at the  $0.3 < x/c < 0.7$  position of the airfoil as illustrated in Figure 4 and have the same height (h) and width (w). From the M1 model to the M4 model, the size of riblet region on the airfoil was increased by gradually reducing the gap between the riblet. The riblet gap ratios for M1, M2, M3 and M4 models are  $s/c=0.1, 0.01, 0.005$  and  $0$ , respectively. For the M4 model, the riblet gap ratio  $s/c=0$  means that the airfoil is completely covered with riblets with a range of  $0.3 < x/c < 0.7$  and there is no gap between the riblets.

**Table 1.** Information of riblet models: location ( $x/c$ ), height ( $h/c$ ), width ( $w/c$ ), and gap ratio ( $s/c$ )

	$x/c$	$h/c$	$w/c$	$s/c$
M0	-	-	-	-
M1	$0.3 < x/c < 0.7$	0.005	0.005	0.1
M2	$0.3 < x/c < 0.7$	0.005	0.005	0.01
M3	$0.3 < x/c < 0.7$	0.005	0.005	0.005
M4	$0.3 < x/c < 0.7$	0.005	0.005	0

Numerical analyzes for all models were carried out at Reynolds number  $Re=1 \times 10^5$  and angle of attack range from  $\alpha=0^\circ$  to  $\alpha=21^\circ$ . The detailed mesh structures of both the controlled NACA 0018 airfoil with riblets are provided in Figure 5. The total number of cells is approximately 500,000. Similar to the  $y^+$  value specified in the plain model; the design criterion for all controlled airfoils is  $y^+ < 1$ .



**Figure 3.** Mesh structure around riblet airfoil

The continuity (Equation 4), momentum (Equation 5) and energy (Equation 6) equations were analyzed with the ANSYS Fluent. In the equations,  $p$  represents static pressure,  $\vec{\tau}$  is the stress tensor, and  $\rho \vec{g}$  is the gravitational force. In the energy equation,  $k_{eff}$  denotes the effective conductivity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

and  $\vec{J}_j$  denotes the diffusion resultant. The right-hand side of Equation 6 represents energy transfer due to conduction, diffusion, and viscous dissipation, respectively. Additionally,  $S_h$  consists of chemical reaction heat and other volumetric heat sources.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (6)$$

Numerical analyzes were carried out with a two-dimensional, density-based, implicit formulation and k-kL- $\omega$  turbulence transition model. The transition model introduced by Walters et. al. [22] is used to predict boundary layer development and calculate the onset of transition. This model is useful for modeling the transition of the boundary layer from the laminar regime to the turbulent regime, and studies in the literature clearly

demonstrate the effectiveness of the model [23-27].

The k-kL- $\omega$  transition model consists of a three-equation of eddy-viscosity type (Equations 7, 8, 9). In this model, kT refers to turbulent kinetic energy, kL refers to laminar kinetic energy, and  $\omega$  refers to the specific dissipation rate. All details about transport equations and constants can be found in the study of [22].

$$\frac{Dk_T}{Dt} = P_{k_T} + R_{BP} + R_{NAT} - \omega k_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$\frac{Dk_L}{Dt} = P_{k_L} + R_{BP} + R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v \frac{\partial k_L}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega L} \frac{\omega}{k_T} P_{k_T} + \left( \frac{C_{\omega R}}{f_W} - 1 \right) \frac{\omega}{k_T} (R_{BP} + R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_{\omega} \alpha_T f_W^2 \frac{\sqrt{k_T}}{d^3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

All analyzes were performed based on steady-state solutions, using the coupled-implicit algorithm scheme with a density-based solver. The least square cell-based method was used for the gradient and the second order discretization method was applied for all other parameters in the spatial discretization. The airfoil surface was accepted as the non-slip wall condition and the flow field was solved with the pressure far field condition for a hydraulic diameter of 0.196 m with 5% turbulence intensity. The outputs of the parameters were adjusted according to  $10^{-8}$  absolute convergence criterion.

To validate the accuracy of the numerical solution model employed in this study, we carried out the study conducted by Yang et. al. [17] on the NACA 4412 with riblets for  $Re=1 \times 10^5$  and angles of attack ( $\alpha$ ) of  $6^\circ$  and  $8^\circ$ . The  $C_L$  values obtained from numerical solutions are presented comparatively in Table 2. The findings obtained revealed the accuracy of the solution models with small margins of error.

**Table 2.** Comparison of lift coefficient for validation of numerical studies

Angle of attack	Yang et. al. (2021)	Our results	Error
$6^\circ$	0.91	0.90	-%1.1
$8^\circ$	1.09	1.095	+%0.45

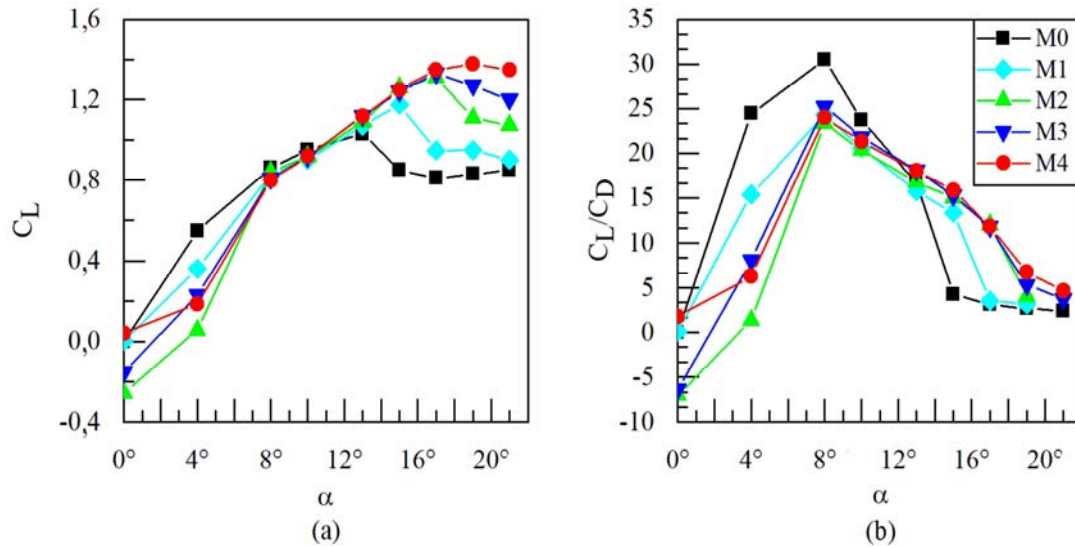
### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In Figure 4, the lift ( $C_L$ ) and the lift-drag ratios ( $C_L/C_D$ ) are given for angles of attack of  $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 13^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 19^\circ$  and  $21^\circ$ , respectively. It is evident from this figure that the impact of the control element is negligible up to the angle of attack of  $\alpha=13^\circ$ . For cases M1 and M4, the results are approximately similar as those obtained from the M0 model (airfoil with no control element) while the M2 and M3 models have a negative lift coefficient at  $\alpha=0^\circ$  due to the higher pressure on the upper (suction) surface of the airfoil. Upon examination of the results obtained from the M1, M2, M3 and M4 models at angle of attack of  $\alpha=4^\circ$ ,

it was observed that they showed lower lifting performance in comparison with the M0 model. In addition, the M2 model has the lowest lift coefficient value compared to the M0 model for the same angle of attack and about 90% decrease in aerodynamic performance is observed. The results obtained from all models exhibit a similar trend at the angles of attack of  $\alpha=8^\circ$  and  $\alpha=10^\circ$ , the lift coefficient value of the M0 model at  $\alpha=13^\circ$  is slightly lower than other models where the control element is used. The lift coefficient value of the M3 and M4 models increased by 9% compared to the M0 model at  $\alpha=13^\circ$ . It is clearly seen in Figure 4(a) that  $\alpha=13^\circ$  is the stall angle of M0 model. On the other hand, it can be inferred that on airfoils where the control element is used, the stall angle is delayed. The stall angle is determined as  $\alpha=15^\circ$  for the M1 model, while for the M2 and M3 models, it is determined as  $\alpha=17^\circ$ . The fact remains that the

stall angle for the M4 model has shifted to an angle of attack of  $\alpha=19^\circ$ . For the M4 model, the stall angle is delayed by  $6^\circ$ , and an improvement of nearly 34% in the lift coefficient is determined at the angle of attack of  $\alpha = 13^\circ$  compared to the plain airfoil profile.

The ratio of lift-drag coefficients of the models using the control element shown in Figure 4 (b) are lower than the M0 model for  $\alpha \leq 10^\circ$ . It is determined that the lift-drag ratio of the M2 model is reduced by 95%. While the lift-drag ratio has approximately the same value for angles of attack of  $\alpha=8^\circ$  and  $10^\circ$  in all models using a control element, an increase in performance after  $\alpha=13^\circ$  is observed by delaying the stall in the models other than M0. For the M4 model, the maximum lift-to-drag ratio is achieved at  $\alpha=15^\circ$ , exhibiting a remarkable increase of 272% compared to the M0 model.



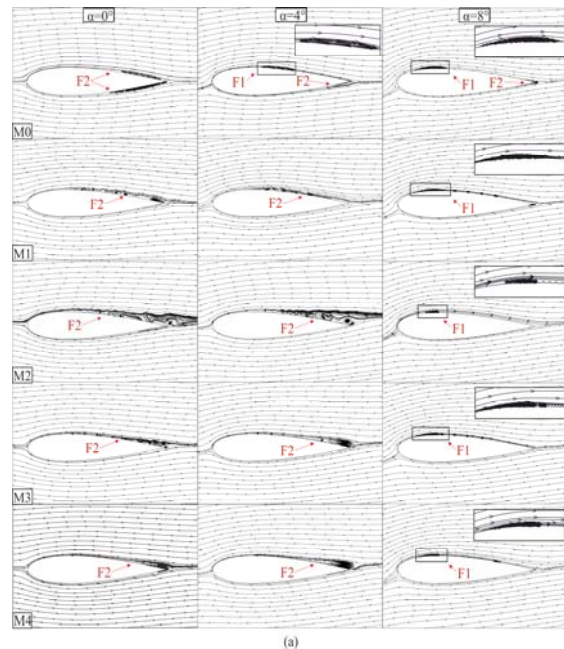
**Figure 4.** a) Variation of lift coefficient with the angles of attack, b) Variation of lift to drag ratios with the angles of attack

The streamline topologies are presented in Figure 7 for  $\alpha=0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ , and in Figure 6 for  $\alpha=13^\circ, 17^\circ, 21^\circ$  to examine the flow structure around the models. For the M0 model, it is observed that the trailing edge separation, indicated by the symbol F2

in Figure 7, occurs when the angle of attack is  $\alpha=0^\circ$ . It is observed that at  $\alpha=4^\circ$ , in addition to the separation of the trailing edge, a laminar separation bubble (denoted by the symbol F1 in the figure) is formed and with increasing angles of attack, the

laminar separation bubble moved forward to the leading edge. It is discerned that at  $\alpha = 13^\circ$ , the separation of the trailing edge moves towards the leading edge, creating a much wider circulating flow region on the airfoil suction surface. At post-stall angles of attack ( $\alpha=17^\circ$  and  $\alpha=21^\circ$ ), the trailing edge separation shifts towards the leading edge, coupled with the presence of a laminar separation bubble, leading to the formation of a continuous circulating flow region (indicated by the symbol F3 in the figure) that spans the airfoil suction surface. It is observed that airfoil models using riblet structures as control elements negatively affect the flow structure at low angles of attack. The fluctuations in the flow structure at the trailing edge are notable at angles of attack  $\alpha=0^\circ$  and  $\alpha=4^\circ$ , particularly for the M1 and M2 models with a higher gap ratio between riblet structures. Conversely, a more distinct circulating flow region is observed for the M3 and M4 models, where the gap ratio between riblet structures is lower, compared to the clean model. These alterations in the flow structures around the riblet models elucidate the reasons behind the lower lift coefficients compared to the clean model. At an increased angle of attack ( $\alpha=8^\circ$ ), a laminar separation bubble (F1) forms near the leading edge in all models, terminating at  $x/c=0.3$ . Moreover, it is noted that the bubble length in the M2 and M4 models is smaller than in the other models. At angle of attack of  $\alpha=13^\circ$ , the advancement of trailing edge separation towards the leading edge is stopped by the help of riblets, occurring approximately at the chord length ratio  $x/c=0.7$ . Consequently, in contrast to the M0 model, an increase in lift coefficient is observed, preventing stall. At  $\alpha=17^\circ$ , laminar separation and trailing edge separation coalesce to form a broad circulation region post-stall for the M1 model. In the M2, M3, and M4 models, while the circulating flow region resulting from trailing edge separation expands, its merging with the laminar separation bubble is prevented. This unequivocally demonstrates the efficacy of the riblet gap ratio as a parameter influencing both aerodynamic forces and flow structure. The streamlines obtained for all models at an angle of

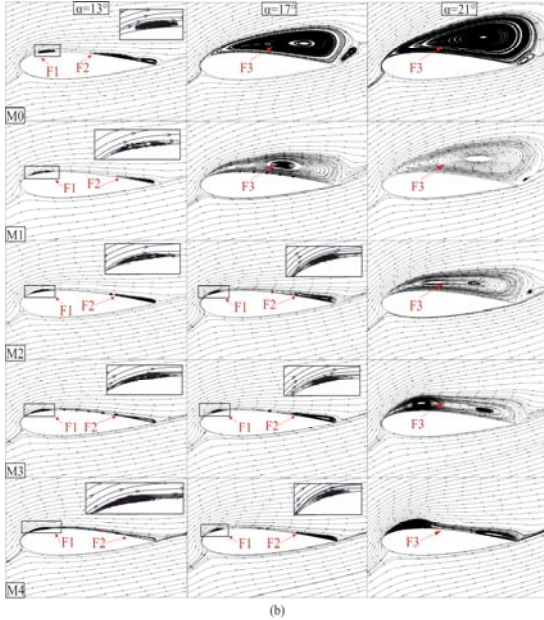
attack  $\alpha=21^\circ$  delineate the flow structure after stall. While a unified region is formed for M0 and M1 models by the circulation region, transitioning from the M2 model to the M4 model reveals an attempt by the laminar separation bubble and trailing edge separations to maintain distinct structures within the formed circulating flow region on the airfoil suction surface. Consequently, a more flattened circulating flow region is observed, particularly in the riblet structures region of the M4 model. This observation aligns with force coefficient analysis, as depicted in Figure 6, where the M4 model exhibits the highest  $C_L$  values.



**Figure 5.** Streamline topologies for different airfoil at angles of attack of  $\alpha= 0^\circ, 4^\circ$  and  $8^\circ$

In Figure 9 and 10, velocity contours in the flow direction around different models are presented for various angles of attack ( $\alpha = 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$  in Figure 9, and  $\alpha = 13^\circ, 17^\circ, 21^\circ$  in Figure 10). The legend below the velocity contours indicates that red regions signify acceleration resulting from an increase in the angle of attack, while blue regions represent flow separations and bubble formation.





**Figure 6.** Streamline topologies for different airfoil at angles of attack of  $\alpha= 13^\circ$ ,  $17^\circ$  and  $21^\circ$

The contours are drawn with a constant increase in  $u/U_\infty$  from low (blue color) to high velocity (red color), maintained at 0.2. As evident from the figure, the velocity increases at the leading edge of the suction surface from  $\alpha=0^\circ$  to  $\alpha=13^\circ$  before stall angles. Beyond the stall angles, the velocities on the airfoil suction surface decrease with increasing angle of attack. For the M0 airfoil model without a control element, the density of the negative velocity region on the airfoil suction surface significantly increases at  $\alpha = 17^\circ$  and  $21^\circ$  due to stall, leading to the circulating flow region mentioned in Figure 6. Additionally, owing to the greater negative velocity values on the airfoil suction surface at high angles, a decrease in pressure difference between the upper and lower regions of the airfoil is observed. In other words, a substantial stall is noted after  $\alpha=13^\circ$ . It is observed that the stall angle is effectively increased for all controlled models except the M0 model. Despite an increase in the angle of attack, especially as the distance between the riblets on the airfoil decreases, the negative velocity region on the airfoil is suppressed. The lifting force of the airfoil partially increases up to  $\alpha=17^\circ$  for the M1 model and up to  $\alpha=21^\circ$  for the M2 and M3 models.

In Figure 11, the variation of the pressure coefficient ( $C_p$ ) along the chord length is depicted for all models at different angles of attack. The negative values of the pressure coefficient are employed by multiplying the results by -1 to create these graphs. Consequently, positive values above the horizontal axis signify pressure coefficients on the suction (top) surface, while negative values below the horizontal axis indicate pressure coefficients on the pressure (bottom) surface of the airfoil. At low angles of attack, observable fluctuations in both positive and negative pressure coefficients in regions where the control element is utilized suggest the formation of small circulating flow regions. These structures introduce instabilities in the flow, consequently impacting the lift coefficient adversely. Despite a decrease in pressure coefficient fluctuations with an increase in angle of attack, wider gap ratios between riblets persist for the M1 and M2 models at all angles of attack. The peak observed in the positive pressure coefficient distribution for the M0 model at  $\alpha=4^\circ$  and chord length ratio  $x/c=0.5$  represents the laminar separation bubble. This peak shifts to lower chord ratio values with increasing angle of attack. In controlled airfoil models, this peak formation is observed at  $\alpha=8^\circ$ , aligning with the streamlines. Additionally, at angle of attack  $\alpha=8^\circ$ , the re-attachment of the separated boundary layer in the M0 model occurs at  $x/c=0.38$ , while for all other models, the re-attachment occurs at  $x/c = 0.3$ . This indicates that the groove at  $x/c=0.3$  induces early turbulence transition in the boundary layer, promoting its adherence to the surface. The applied control method's effect is prominently visible at angles of attack ( $\alpha \geq 13^\circ$ ) after stall case for M0. At these angles, a more gradual separation occurs instead of a sharp one, and the riblets produce the highest  $-C_p$  values. This effect is evident in both the force coefficients graph and the streamline topology. For all controlled models (M0, M1, M2, and M3), at angles of attack  $\alpha=15^\circ$ ,  $\alpha=17^\circ$ ,  $\alpha=19^\circ$ , and  $\alpha=21^\circ$ , respectively, there is a decrease in the highest  $C_p$  values due to the combination of laminar separation bubble and trailing edge separation.

When comparing the M0 and M3 airfoil models at  $\alpha=13^\circ$ , the maximum reduction in laminar separation bubble length is approximately 30%.

Notably, the formation of the circulating flow region is prevented for the airfoil model M4 due to the zero-gap ratio of the riblets ( $s/c = 0$ )

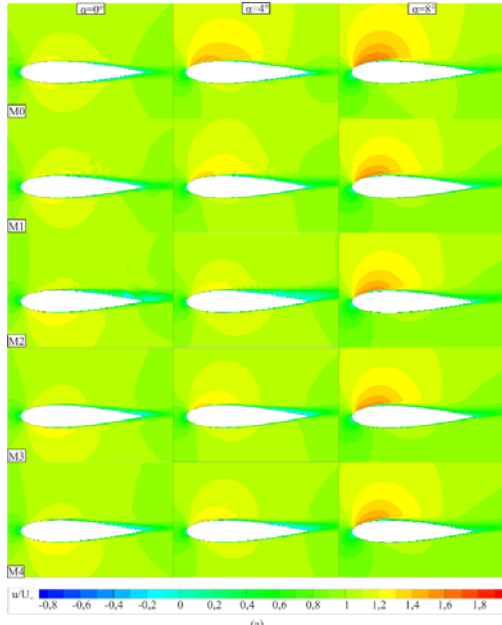


Figure 7. Streamwise velocity contours at angles of attack of  $\alpha = 0^\circ, 4^\circ$  and  $8^\circ$

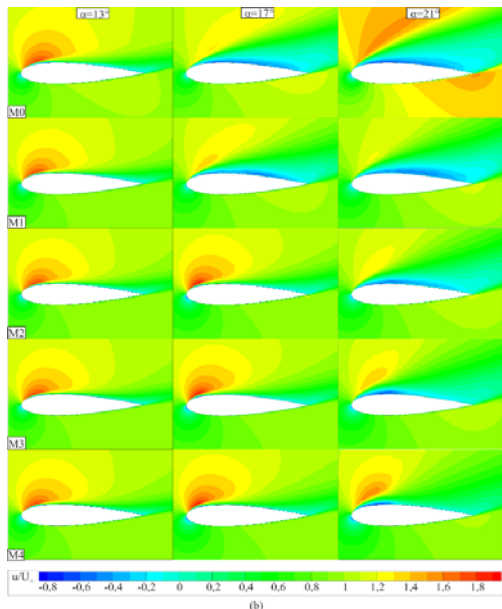


Figure 8. Streamwise velocity contours at angles of attack of  $\alpha = 13^\circ, 17^\circ$  and  $21^\circ$

To elucidate the impact of riblets on the airfoil's turbulent flow structure, Figure 12 displays the distributions of turbulent kinetic energy (TKE) obtained at angle of attack values of  $\alpha = 13^\circ, \alpha = 17^\circ$ , and  $\alpha = 21^\circ$ . To facilitate the comparison for all models, the increment value in the TKE contours is kept constant as 0.05. At  $\alpha = 13^\circ$ , the M0 model, lacking a control element, exhibits the highest TKE value. Notably, in all models employing the control element, TKE values are lower, attributable to the constraint imposed by riblets on laminar separation bubble and trailing edge separation. At  $\alpha = 17^\circ$ , the TKE contours extend over a wide flow area due to the extensive circulation region on the M0 and M1 models. At  $\alpha = 21^\circ$ , the turbulence kinetic energy region expands for both models with and without a control element. The diminishing extent of high-energy TKE contour regions in models with the control element underscores the efficacy of the applied control method in delaying stall at high angles of attack ( $\alpha = 13^\circ$  and  $17^\circ$ ). Furthermore, these findings suggest that beyond improving aerodynamic performance, the control method has the potential to mitigate adverse effects such as vibrations by reducing the turbulent zone around the airfoil.

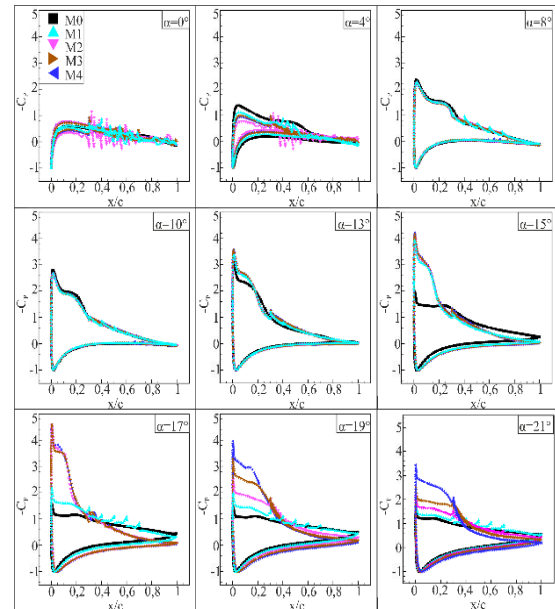
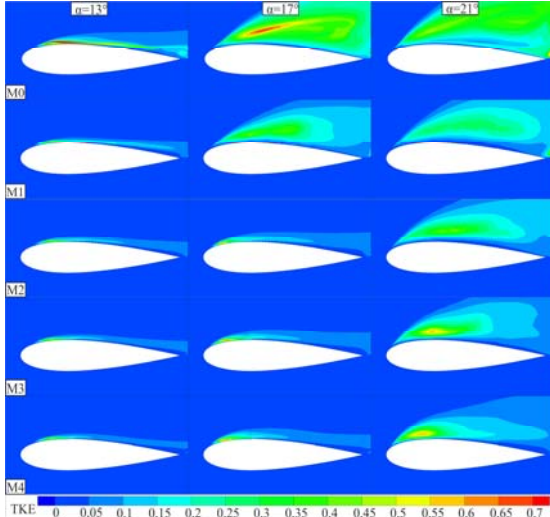


Figure 9. Distributions of pressure coefficients at various angles of attack



**Figure 10.** Turbulence Kinetic Energy (TKE) contours at angles of attack of  $\alpha=13^\circ$ ,  $\alpha=17^\circ$  and  $\alpha=21^\circ$

#### 4. CONCLUSION

This study investigates the impact of riblet structures on the suction surface of a NACA 0018 airfoil on its aerodynamic performance through two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis at a Reynolds number of  $Re=1 \times 10^5$ . The research parameters include riblet gap ratio and angle of attack, with comparative analysis against a plain model (airfoil without riblets).

Specifically, at  $\alpha=13^\circ$ , stall in the plain airfoil model, resulting from the merging of leading-edge separation and trailing edge separation, is prevented by riblet structures. The stall angle increases with decreasing gap ratio between the riblets, delaying stall by up to  $6^\circ$  compared to the clean airfoil model. Additionally, a substantial increase in the lift coefficient has been noted.

For  $s/c=0$  riblet gap ratio, a notable up to 34% increase in the lift coefficient is observed compared to the plain airfoil model. When comparing lift-drag ratios ( $C_L/C_D$ ) for the same models, this ratio experiences a remarkable 272% increase. Turbulence kinetic energy (TKE) values indicate lower turbulence intensity in controlled models, particularly starting from the leading edge.

Analysis of pressure coefficient distributions reveals that decreasing the distance between riblets until stall increases the pressure difference between the suction and pressure surfaces, thereby enhancing the lifting. Consequently, riblets, when employed as control elements, prove to be an effective flow control method for augmenting airfoil aerodynamic performance. The obtained data suggests an alternative approach applicable to studies on the maneuverability of small-scale unmanned aerial vehicles or efficiency improvements in wind turbines.

#### 5. REFERENCES

1. Huber, A., Mueller, T., 1987. The Effect of Trip Wire Roughness on the Performance of the Wortmann FX 63-137 Airfoil at Low Reynolds Numbers. *Experiments in Fluids*, 5, 263-272.
2. Gopalarathnam, A., Broughton, B., McGranahan, B., Selig, M., 2001. Design of Low Reynolds Number Airfoils with Trips. Presented at the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Anaheim, CA, 2463.
3. Sareen, A., Deters, R.W., Henry, S.P., Selig, M.S., 2011. Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines. Presented at the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, 558.
4. Lee, S.J., Lim, H.C., Han, M., Lee, S.S., 2005. Flow Control of Circular Cylinder with a V-Grooved Micro-Riblet Film. *Fluid Dyn. Res.*, 37(4), 246-266.
5. Vilkinis, P., Šereika, J., Pedišius, N., Zygmantas, G., 2022. Experimental Study of Flows over Triangular Riblets in Cavity-like Geometry. *Experimental Thermal and Fluid Science* 134, 110621.
6. Zhang, Y., Chen, H., Fu, S., Dong, W., 2018. Numerical Study of an Airfoil with Riblets Installed Based on Large Eddy Simulation. *Aerospace Science and Technology* 78, 661-670.
7. Akansu, Y.E., Özmert, M., Firat, E., 2011. Akış Kontrol Çubuğu ile Kare Kesitli Bir Küt Cisim Etrafındaki Akış Kontrolünde Hücum Açısının Girdap Kopma Olayına Etkisi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 31(1), 109-120.

8. Timmer, W., 2008. Two-dimensional low-Reynolds Number Wind Tunnel Results for Airfoil NACA 0018. *Wind Engineering*, 32(6), 525-537.
9. Karasu, I., Genç, M.S., Açikel, H.H., 2013. Numerical Study on Low Reynolds Number Flows Over an Aerofoil. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 2(5), 1000131.
10. Açikel, H.H., Genç, M.S., 2018. Control of Laminar Separation Bubble over Wind Turbine Airfoil Using Partial Flexibility on Suction Surface. *Energy* 165, 176-190.
11. Güler, A., Seyhan, M., Akansu, Y., 2018. Effect of Signal Modulation of DBD Plasma Actuator on Flow Control around NACA 0015. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 38(1), 95-105.
12. Hussein, E., Azziz, H., Rashid, F., 2021. Aerodynamic Study of Slotted Flap for NACA 24012 Airfoil by Dynamic Mesh Techniques and Visualization Flow. *Journal of Thermal Engineering*, 7(2), 230-239.
13. Ozkan, G.M., Egitmen, H., 2022. Turbulent Structures in an Airfoil Wake at Ultra-low to Low Reynolds Numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science* 134, 110622.
14. Lee, S.J., Jang, Y.G., 2005. Control of Flow Around a NACA 0012 Airfoil with a Micro-riblet Film. *Journal of Fluids and Structures*, 20(5), 659-672.
15. Wu, Z., Li, S., Liu, M., Wang, S., Yang, H., Liang, X., 2019. Numerical Research on the Turbulent Drag Reduction Mechanism of a Transverse Groove Structure on an Airfoil Blade. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 1024-1035.
16. Tiainen, J., Grönman, A., Jaatinen-Värri, A., Pyy, L., 2020. Effect of Non-ideally Manufactured Riblets on Airfoil and Wind Turbine Performance. *Renewable Energy* 155, 79-89.
17. Yang, X., Wang, J., Jiang, B., Li, Z., Xiao, Q., 2021. Numerical Study of Effect of Sawtooth Riblets on Low-Reynolds-Number Airfoil Flow Characteristic and Aerodynamic Performance. *Processes*, 9(12), 2102.
18. Meena, M.G., Taira, K., Asai, K., 2018. Airfoil-Wake Modification with Gurney Flap at Low Reynolds Number. *AIAA Journal*, 56(4), 1348-1359.
19. Göv, İ., Doğru, M.H., Korkmaz, Ü., 2019. Uçuş Esnasında Değiştirilebilir Kanat Profili Kullanarak NACA 4412'nin Aerodinamik Performansının Artırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 34(2), 1109-1125.
20. Harris, R.E., 2013. Adaptive Cartesian Immersed Boundary Method for Simulation of Flow over Flexible Geometries. *AIAA Journal*, 51(1), 53-69.
21. Tang, J., Viieru, D., Shyy, W., 2008. Effects of Reynolds Number and Flapping Kinematics on Hovering Aerodynamics. *AIAA Journal*, 46(4), 967-976.
22. Walters, D.K., Leylek, J.H., 2004. A New Model for Boundary Layer Transition Using a Single-point RANS Approach. *J. Turbomach.*, 126(1), 193-202.
23. Walters, D.K., Cokljat, D., 2008. A Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flow. *Journal of Fluids Engineering*, 130(12), 121401.
24. Aftab, S.M.A., Mohd Rafie, A.S., Razak, N.A., Ahmad, K.A., 2016. Turbulence Model Selection for Low Reynolds Number Flows. *PLoS ONE*, 11(4), e0153755.
25. Ahmed, Y.M., Elbatran, A.H., 2018. Numerical Study of the Flow Field Characteristics over a Backward Facing Step using k-kl- $\omega$  Turbulence Model: Comparison with Different Models. *World Journal of Engineering*, 15(1), 173-180.
26. Gaggero, S., Villa, D., 2018. Improving Model Scale Propeller Performance Prediction Using the k-k L- $\omega$  Transition Model in OpenFOAM. *International Shipbuilding Progress*, 65(2), 187-226.
27. Salimpour, E., 2019. A Modification of the k-k- $\omega$  Turbulence Model for Simulation of Short and Long Separation Bubbles. *Computers & Fluids*, 181, 67-76.

## Depolama Entegreli Dağıtım Sistemlerinin Ekonomik Optimizasyonu

Fatma AVLİ FIRIŞ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-4879-1932

İsrafil KARADÖL<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-9239-0565

Ökkeş Fatih KEÇECİOĞLU<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7004-4947

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

<sup>2</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kilis

Geliş tarihi: 11.07.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: AVLİ FIRIŞ, F., KARADÖL, İ., KEÇECİOĞLU, Ö.F., (2024). Depolama Entegreli Dağıtım Sistemlerinin Ekonomik Optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 133-143.

### Öz

Bu çalışmanın amacı, aktif bir elektrik dağıtım sistemine bir enerji depolama sisteminin dâhil edilmesiyle gün öncesi ve gün içi elektrik piyasalarında gerçekleştirilecek enerji alışverişinde ekonomik optimizasyonu sağlamaktır. Bu amaçla geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama problem, Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GAMS) aracılığıyla Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) ile formüle edilmiş ve CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Modellemedeki belirsiz parametreler, Monte Carlo Simülasyonu ile ele alınarak bu yönde senaryo seçimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin doğruluğunu ve etkinliğini teyit etmek için, ele alınan dağıtım sisteminin seçili bir pilot fideri üzerinde ve gerçek verilerle simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında ele alınan işletme maliyetleri, şebekede enerji depolama kullanılıp kullanılmadığı durumlarda ayrı olarak hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Edinilen sonuçlara göre, şebekeye enerji depolama sistemi entegre edildiği durumlarda, depolama sisteminin hiç bulunmadığı durumlara göre günlük ortalama işletme 600 doları aşkın bir düşüş gözlenmiştir. Böylelikle, önerilen modelin elektrik dağıtım sisteminin ekonomik işletimini desteklemeyi etkin bir şekilde gerçekleştirebileceği de doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji depolama, Elektrik piyasası, Dağıtım sistemi, Ekonomik optimizasyon, İşletme maliyeti

### Economic Optimization of Storage Integrated Distribution Systems

#### Abstract

The aim of this study is to provide economic optimization in the energy exchange to be realized in the day-ahead and intra-day electricity markets by incorporating an energy storage system into an active electric

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Fatma AVLİ FIRIŞ, fatma.avli.firis.01@gmail.com

distribution system. The two-stage stochastic programming problem developed for this purpose was formulated with Mixed Integer Linear Programming (MILP) through the General Algebraic Modeling System (GAMS) and solved with the CPLEX solver. Uncertain parameters in modeling were handled with Monte Carlo Simulation and scenario selection was made in this direction. In order to confirm the accuracy and effectiveness of the proposed model, simulation studies were carried out on a selected pilot feeder of the considered distribution system and with real data. The operating costs, which are considered in the simulation studies, are calculated separately and compared in cases where energy storage is used in the grid. According to the results obtained, when energy storage is integrated into the grid, the average daily operation is reduced by more than 600 dollars compared to the case where no storage is available. Thus, it is confirmed that the proposed model can effectively support the economic operation of the electric distribution system.

**Keywords:** Energy storage, Electricity market, Distribution system, Economic optimization, Operating cost

## 1. GİRİŞ

Günümüz ekonomik ve doğal koşulları, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik güç sistemlerine giderek artan entegrasyonunu kaçınılmaz hale getirmektedir.

Özellikle elektrik enerjisinin son kullanıcıya kadar ulaştırılmasının kritik önem arz ettiği kısım olan elektrik dağıtım sistemlerinde enerji tedariki sürekliliğinin ve dağıtım esnekliğinin daha iyi sağlanması için tüm kaynakların bir arada ve en uygun bir şekilde kullanılması gereklidir [1-4]. Ancak bu entegrasyonlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliği sorunları, adalaşma, plansız-zorunlu kesintiler gibi planlama ve işletimden kaynaklı bir takım zorlukları da beraberinde getirmektedir [5,6]. Teknik kalite standartlarının sağlanabilmesinin yanı sıra bir elektrik dağıtım sisteminin en kritik konularından biri, işletme maliyetidir. bulunmaktadır [5,6]. Geline bu noktada, enerji depolama sistemlerinin stratejik bir şekilde kullanılması, şebeke operatörlerine yanıt verebilen ve adapte olabilen bir kaynak sağlayarak yenilenebilir enerji üretimi ve yük talebindeki değişkenliği etkili bir şekilde yönetme kapasitesi sunmaktadır. Böylelikle, enerji depolama sistemleri, fazla enerjiiyi depolama ve gerektiğinde sorunsuz bir şekilde serbest bırakma esnekliği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarını yönetme alanında önemli bir ilgi görmüştür [7]. Bu bağlamda, dağıtım sistemlerine entegre edilecek enerji depolama sistemlerinin doğru planlamalarla efektif kullanımları, teknik

kısıtların gerekliliklerini yerine getirebileceği gibi ekonomik açıdan da oldukça olumlu sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji depolama sistemlerinin birlikte tahsis edilmesine yönelik çeşitli araştırmalar yapılmış, çeşitli metodolojiler ve optimizasyon algoritmaları önerilmiştir.

Gerçekleştirilen literatür araştırmalarında; optimal sistem işletimi ve enerji depolama planlaması ile şebeke esnekliğinin artırılması ve maliyet minimizasyonunun sağlanması konularında bazı çalışmaların öne çıktığı görülmüştür. Yang ve arkadaşları ana şebekeden izole halde bir mikro şebeke için yedek rezerv hizmeti sağlayan enerji depolama sistemi kullanarak izole mikro şebekenin işletme maliyetinin minimize edilmesi amaçlı Şans Kısıtlı Programlama (CCP) tabanlı programlama kullanmış ve yeni bir optimal planlama modeli sunmuştur. Sunulan model, GAMS programında MILP formülasyonuna dönüştürülmüş ve CPLEX çözücü ile çözülmüştür [8]. Farzin ve arkadaşları mikro şebekelerde bulunan enerji depolama sistemlerinin gün öncesi planlaması için skolastik bir çerçeve sunmuşlardır. Mikro şebekenin işletim maliyeti, normal koşullarda ve planlanmamış adalaşma durumunda yük kesintisi indeksi önerilen şemanın ana kriteri olarak seçilmiştir. Mikro şebekenin yükü ve yenilenebilir enerji üretiminin zamanı ve süresiyle alakalı belirsizlikler MILP problemi ile formüle edilmiş ve Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma (NSGA-II) ile çözümlenmiştir [9]. MILP modeliyle yürütülen çalışmalara ek olarak; Raghavan ve arkadaşları

Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanarak mikro şebekede enerji depolama sistemi için gün öncesi planlama stratejisi sunmuşlardır. Planlama stratejisi, dinamik fiyatlandırmaya tabi bir mikro şebekede tüketiciler tarafından ödenen maliyeti en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ile farklı boyutlarda üç mikro şebeke için şebeke fiyat tahminleri, enerji üretimi ve yük içeren simülasyonda Net Güç Tabanlı Algoritma kullanılarak ortalama maliyet düşüşü sağlayan enerji depolama sistemi planlaması elde edilmiştir [10].

Optimal planlama işletimin mikro şebeke ölçeğinde yürütüldüğü çalışmalara ilaveten, aktif elektrik dağıtım sistemlerinin işletilmesi kapsamında ana şebekeyle bağlantılı olarak ele alınan araştırmalar incelendiğinde ilgili araştırmaların ağırlıklı olarak ekonomik işletmeye odaklandığı görülmektedir. Optimal planlama modelinin amaç fonksiyonu genellikle şebekeden satın alınan veya şebekeye satılan elektrik miktarı ile belirlenmektedir. Wang ve arkadaşları aktif dağıtım şebekesinde depolama teknolojileri ile güneş ve rüzgar enerjisi üretimini kullanan entegre bir enerji sistemi planlama modeli önermiş, iki aşamalı hiyerarşik enerji yönetimi çerçevesi ile en uygun planlama stratejisini önermiştir [11]. Ho ve arkadaşları biyokütle ve güneş enerjisi kaynaklarını içeren hibrit bir enerji üretim sistemine entegre edilmiş enerji depolamanın planlamasını günlük ve haftalık işletim modlarında incelemişlerdir. Ayrıca her iki modun avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırarak maliyet analizlerini gerçekleştirmişlerdir [12]. Zhang ve arkadaşları, dağıtım sistemi işletiminin toplam giderlerini en aza indirmek için, talep karşılama ve pil enerji depolama sistemlerini dikkate alan bir optimizasyon modeli önermiştir. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek nüfuzuna sahip dağıtım sisteminin gün öncesi planlama analizi için Matlab simulink yoluyla modifiye edilmiş bara sistemine dayalı bir simülasyon platformu geliştirmişlerdir [13].

Bu referansların incelenmesi sonucunda, enerji depolama ile yenilenebilir enerji kaynakları içeren sistemlerin ekonomik optimizasyonunun sağlanması doğrultusunda optimal enerji yönetimi üzerine geniş kapsamlı bir araştırmanın yapıldığı

açıkça görülmektedir. Ancak, bu ilerlemelere rağmen, yenilenebilir kaynakların çıkış gücü, şebeke yükü ve dalgalı elektrik fiyatları gibi belirsizliklerin gerçekçi bir şekilde ele alınarak optimal planlamanın gerçekleştirilmesine yönelik bir araştırma boşluğu devam etmektedir. Çünkü, özellikle aktif elektrik dağıtım şebekelerinde beklenmedik ve önemli değişiklikler olabilmektedir. Örneğin halihazırda dağıtım sistemine bağlı yüksek düzeyde yük tüketen sanayi tesislerinin resmi veya dini bayram günlerinde duruşa geçerek devreden çıkması, şebeke yükünü çok düşük seviyelere getirebilmektedir. Aynı mantıkla enerji arz-talep değişkenliği sonucunda piyasa fiyat dalgalanması yaşanabilmektedir. Bir diğer durumda ise ani hava olayları (bulutlanma, rüzgârın yavaşlaması ya da birden durması gibi) veya beklenmedik arıza akımları nedeniyle, yüksek güçlü bir yenilenebilir enerji santrali durma noktasına gelebilmekte ve planlanan arz-talep dengesinde bozulmalar meydana gelebilmektedir.

Yürütülen bu çalışma ile, aktif elektrik dağıtım sistemlerinde olası şebeke koşulları göz önünde bulundurularak ve gerçek dünya verileri ele alınarak araştırma boşluğunun doldurulması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre halde bulunduğu aktif ve gerçek bir elektrik dağıtım sistemine enerji depolama sisteminin eklenmesiyle sistemin teknik kısıtları karşılanırken ekonomik optimizasyonun sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda dağıtım sistemi işletmecisinin gün öncesi ve gün içi elektrik piyasalarında gerçekleştirilen işlemleri temsil eden iki aşamalı stokastik bir programlama çerçevesi geliştirilmiştir. Modellemenin etkinliğini ve doğruluğunu teyit etmek için yürütülen simülasyon çalışmalarında gerçek bir elektrik dağıtım şebekesinin seçili bir fideri ve gerçek verileri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu analizler ve sonuçların ele alınma şekilleri, makalenin özgün yönünü ortaya koymaktadır.

Bu makalenin başlıca katkıları şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Önerilen model, mevcut durumda dağıtım sisteminde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarına ilaveten enerji depolama sistemi

entegrasyonu ile ekonomik optimizasyonun sağlanması konusunu ele almaktadır.

- Sunulan çerçeve ile, dağıtım sistemine bağlı yüklerin enerji ihtiyacı, elektrik piyasalarından puant zamanlarda yüksek fiyatlardan satın alınması yerine, yenilenebilir kaynaklardan elde edilip uygun zamanda saklanan enerjinin kullanılmasıyla yüksek enerji maliyetinden kaçınılması sağlanmaktadır.
- Problem, iki aşamalı stokastik bir problem olarak modellenmiş ve problem belirsizlikleri Monte Carlo simülasyonu ile ele alınmıştır.
- Hesaplanan işletme maliyetleri şebekede enerji depolamanın kullanılıp kullanılmadığı durumlar altında analiz edilmiştir.

Bu ilk bölümde bir giriş, literatür taraması ve çalışmanın katkısı sunulurken, 2. Bölüm'de önerilen metodoloji, matematiksel model, amaç fonksiyonu ve problemin kısıtlamaları hakkında bilgiler verilmektedir. 3. Bölüm'de, simülasyon çalışmaları verilirken, 4. Bölüm'de çalışmadan edinilen sonuçlar sunulmaktadır.

## 2. YÖNTEM

Çalışmada önerilen iki aşamalı matematiksel model, dağıtım şebekesindeki nodal güç dengesi, yukarı akış ağı ve güç işlemleri ile ilgili teknik kısıtlamaları yerine getirirken işletme maliyetini minimize etmektedir. Modellemenin ilk aşamasında kullanılan ve A1 ile ifade edilen karar değişkenleri, üretim kaynaklarının aktif güç çıkışlarını, yüklerin aktif güç tüketimlerini ve yukarı yönlü şebeke güç akışlarını içermekte ve talep tarafı rezervlerinin konuşlandırılması gibi önceden planlanmış değişkenlerin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Bu karar değişkenleri gün öncesi piyasalarında verilen kararlarla yorumlanmakta ve herhangi bir özel senaryoya bağlı olmamaktadır. İkinci aşamada kullanılan ve A2 ile gösterilen karar değişkenleri ise şebekenin gerçek zamanlı işletiminde ikili güç akışına ilişkin süreçleri kapsamakta ve senaryolara bağlı durumların oluşmasından etkilenmektedir. Modellemede toplam işletme maliyetinin gösterimi, iki aşamalı karar değişkenlerinin toplamından oluşan amaç fonksiyonu ile ifade edilmekte ve matematiksel gösterimi aşağıda verilmektedir.

$$\text{Min } AF = \sum_{t=1}^{24} (C_{A1,t} + EC_{A2,t\omega}) \quad (1)$$

$$C_{A1,t} = (\lambda_t^{GÖ,Al} * P_t^{GÖ,Al}) - (\lambda_t^{GÖ,Sat} * P_t^{GÖ,Sat}) + (\lambda_t^{TT,Y} * R_t^{TT,Y}) + (\lambda_t^{TT,A} * R_t^{TT,A}) \quad (2)$$

$$EC_{A2,t\omega} = \sum_{\omega=1}^N \pi_{\omega} [(\lambda_{t\omega}^{G1,Al,+} * \Delta P_{t\omega}^{G1,Al,+}) - (\lambda_{t\omega}^{G1,Al,-} * \Delta P_{t\omega}^{G1,Al,-}) + (\lambda_{t\omega}^{G1,Sat,-} * \Delta P_{t\omega}^{G1,Sat,-}) - (\lambda_{t\omega}^{G1,Sat,+} * \Delta P_{t\omega}^{G1,Sat,+}) + \lambda_{t\omega}^{TD} * (R_{t\omega}^{TD,Y} - R_{t\omega}^{TD,A}) + (\lambda_{t\omega}^{YAT} * P_{t\omega}^{YAT})] \quad (3)$$

Bu eşitliklerde yer alan; t zamanı,  $\omega$  A2'de gerçekleşen indeksi,  $\pi$  senaryonun olasılığını,  $\lambda$  megavat başına fiyatı, P aktif gücü ve R talep tarafı rezervini ifade eder. Buna ek olarak, Al ve Sat sırasıyla piyasadan satın alım ve piyasada satış anlamına gelirken, GÖ ve Gİ gün öncesi ve gün içi piyasasını, TT talep tepkisini, Y ve A yukarı ve aşağı değişimleri, + ve - pozitif ve negatif sapmaları ifade eder. Son olarak, TD dağıtılan enerji olup YAT yük atma anlamına gelir.  $C_{A1,t}$  ana şebekeden enerji alımı, ana şebekeye enerji satışı ve bir gün önce talep tarafı rezervleriyle kararlaştırılan bir fiyat üzerinden belirlenen enerji maliyetleri eksi müşteriye satılan enerji dahil olmak üzere ilk aşama maliyetlerini temsil eder. Benzer şekilde,  $EC_{A2,t\omega}$  ana şebeke ile güç alışverişini ayarlamının beklenen maliyetleri, talep tarafı rezerv tahsis maliyeti ve yük kesinti maliyetleri dahil olmak üzere ikinci aşama maliyetlerini temsil eder. Beklenen maliyet kapsamında, gerçek zamanlı olarak bir gün öncesinde planlanan enerji miktarından sapma ne kadar büyükse, bu maliyet de o kadar yüksek olacaktır. Bir gün önce belirlenen kullanılabilir kapasiteden sapma ne kadar yüksek olursa, talep yönlü rezerv tahsis maliyeti de o kadar yüksek olacaktır. Öte yandan şebekede enerji üretim ve enerji tüketim eşitliğinin sağlanamaması durumunda yük kesintisi zorunlu olacaktır. Ancak bu durum tercih edilmek istenmeyen bir durumdur ve kesinti maliyeti oldukça yüksek olacaktır.

### 2.1. Gün Öncesi Kısıtları

Aşağıdaki eşitlikler, birinci aşama kararları için kısıtlamaları temsil etmektedir.



$$P_t^{GÖ,DS} + P_t^{GÖ,Al} - P_t^{GÖ,Sat} = 0 \quad (4)$$

$$P_t^{GÖ,DS} = P_t^{GÖ,GES} - P_t^{GÖ,Yük} + P_t^{GÖ,Bat,-} - P_t^{GÖ,Bat,+} \quad (5)$$

$$P_t^{GÖ,GES,min} \leq P_t^{GÖ,GES} \leq P_t^{GÖ,GES,max} \quad (6)$$

$$P_t^{GÖ,Yük,min} \leq P_t^{GÖ,Yük} \leq P_t^{GÖ,Yük,max} \quad (7)$$

$$SOC_t^{GÖ,Bat} = SOC_{t-1}^{GÖ,Bat} + \left( \frac{\eta_t^{GÖ,Bat} * \Delta T}{E_t^{GÖ,Bat,max}} \right) * \quad (8)$$

$$\left( P_{t-1}^{GÖ,Bat,+} - \left( \frac{P_{t-1}^{GÖ,Bat,-} * \Delta T}{\eta_t^{GÖ,Bat} * E_t^{GÖ,Bat,max}} \right) \right) \quad (8)$$

$$SOC_t^{GÖ,Bat,min} \leq SOC_t^{GÖ,Bat} \leq SOC_t^{GÖ,Bat,max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_t^{GÖ,Bat,+} \leq \sigma * P_t^{GÖ,Bat,+,max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_t^{GÖ,Bat,-} \leq \eta_t^{GÖ,Bat} * (1 - \sigma) * P_t^{GÖ,Bat,-,max} \quad (11)$$

Eşitlik (4), her zaman dilimindeki güç dengesini ifade eder. Eşitlik (5)'te,  $P_t^{GÖ,DS}$  yukarı ve aşağı doğru enerji akışını belirtir. Bu enerji akışında, üretilen güneş enerjisi çıkış gücü ve depolama deşarj gücünün toplamı ile şebeke yükü ve depolama şarj gücünün toplamı eşit olmalıdır. Güneş enerjisi çıkış gücünün alt ve üst sınırları Eşitlik (6) ile ifade edilirken, şebeke yükünün talep tahmininin alt ve üst limitleri Eşitlik (7) ile ifade edilir. Üretimler ve tüketimler, bu kısıtlamalarla önceden tanımlanmış aralıklar içinde olmalıdır.

Batarya depolama cihazının her zaman dilimindeki şarj durumu (SOC), Eşitlik (8)'e göre hesaplanmaktadır. Eşitlik (9) batarya SOC'sinin alt ve üst sınırlarını verirken, Eşitlik (10) ve (11)

batarya depolama cihazının şarj ve deşarj gücünün alt ve üst sınırlarını verir. Yine burada yer alan  $\sigma$  bataryanın şarj ve deşarj işlemlerinin aynı anda aktif olmadığını göstermektedir. Burada  $n$  dönüştürme verimliliği katsayısı, P aktif güç, E depolama biriminin enerji kapasitesidir.

$$0 \leq P_t^{GÖ,Al} \leq \alpha * P_t^{GÖ,Al,max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_t^{GÖ,Sat} \leq (1 - \alpha) * P_t^{GÖ,Sat,max} \quad (13)$$

Eşitlik (12) ve (13), ana şebekeden alınan veya ana şebekeye satılan enerjinin belirli bir üst ve alt limit içinde olduğunu belirtmektedir. Burada  $\alpha$  ikili bir deşikendir (0 veya 1'e eşittir) ve eş zamanlı alım satım işleminin aktif olmadığını göstermektedir.

$$0 \leq R_t^{TT,Y} \leq R_t^{TT,Y,max} \quad (14)$$

$$0 \leq R_t^{TT,A} \leq R_t^{TT,A,max} \quad (15)$$

Son olarak Eşitlik (14) ve (15), yukarı ve aşağı yönlü kullanılabilir rezerv talebinin özellikle belirli bir üst sınırdan olduğunu göstermektedir.

## 2.2. Gün İçi Kısıtları

Aşağıdaki eşitlikler, ikinci aşama kararları için kısıtlamaları olan; şebekenin gerçek zamanlı çalışmasına ilişkin kısıtlamaları temsil etmektedir.

$$P_{t\omega}^{Gl,DS} + P_{t\omega}^{Gl,Al} - P_{t\omega}^{Gl,Sat} = 0 \quad (16)$$

$$P_{t\omega}^{Gl,DS} = P_{t\omega}^{Gl,GES} - P_{t\omega}^{Gl,Yük} + P_{t\omega}^{Gl,Bat,-} - P_{t\omega}^{Gl,Bat,+} + P_{t\omega}^{YAT} \quad (17)$$

$$P_{t\omega}^{Gl,GES,min} \leq P_{t\omega}^{Gl,GES} \leq P_{t\omega}^{Gl,GES,max} \quad (18)$$

$$P_{t\omega}^{Gl,Yük,min} \leq P_{t\omega}^{Gl,Yük} \leq P_{t\omega}^{Gl,Yük,max} \quad (19)$$

$$SOC_{t\omega}^{Gl,Bat} = SOC_{(t-1)\omega}^{Gl,Bat} + \left( \frac{\eta_{t\omega}^{Gl,Bat} * \Delta T}{E_{t\omega}^{Gl,Bat,max}} \right) * \quad (20)$$

$$\left( P_{(t-1)\omega}^{Gl,Bat,+} - \left( \frac{P_{(t-1)\omega}^{Gl,Bat,-} * \Delta T}{\eta_{t\omega}^{Gl,Bat} * E_{t\omega}^{Gl,Bat,max}} \right) \right)$$

$$SOC_{t\omega}^{Gl,Bat,min} \leq SOC_{t\omega}^{Gl,Bat} \leq SOC_{t\omega}^{Gl,Bat,max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{Gl,Bat,+} \leq \zeta * P_{t\omega}^{Gl,Bat,+,max} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{Gl,Bat,-} \leq \eta_{t\omega}^{Gl,Bat} * (1 - \zeta) * P_{t\omega}^{Gl,Bat,-,max} \quad (23)$$

Eşitlik (16), güç dengesini gerçek zamanlı olarak açıklamaktadır. Burada  $P_{t\omega}^{Gl,DS}$  şebeke tarafından tüketilen veya üretilen aktif gücün yukarı ve aşağı doğru enerji akışını ve gerçek zamanlı değerini ifade etmektedir. Eşitlik (17)-(19), Eşitlik (5)-(7)'ye benzer şekilde olup yenilenebilir üretimlerin ve yükün gerçek zamanlı çalışmasını ifade etmektedir.

Benzer şekilde Eşitlik (20)-(23), Eşitlik (8)-(11)'e benzer şekilde batarya depolamanın gerçek zamanlı çalışmasını ifade etmektedir. İki farklı eşitlik seti arasındaki temel fark, buradaki değişkenlerin senaryolara bağlı olmasıdır.

Bu aşamada yer alan, gerçek zamanlı güç akışına ilişkin eşitlikler daha detaylı analiz edilecek olursa; Eşitlik (16)'da yer alan son iki terimin ana şebekenin yukarı akış şebekesi ile güç ticaretini yansıttığı ve aşağıdaki şekilde hesaplandığı ifade edilebilir:

$$P_{t\omega}^{Gl,Al} = \Delta P_{t\omega}^{Gl,Al} + P_t^{G0,Al} \quad (24)$$

$$P_{t\omega}^{Gl,Sat} = \Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat} - P_t^{G0,Sat} \quad (25)$$

Eşitlik (26) ve (27)'deki amaç, Eşitlik (12) ve (13)'tekine benzemektedir ve ana şebekeden alınan veya ana şebekeye satılan enerjinin gerçek zamanda belirli bir üst ve alt limit içinde olduğunu belirtmektedir. Burada da  $\psi$ , ikili bir değişkendir (0 veya 1'e eşittir) ve eş zamanlı alım satım işleminin aktif olmadığını göstermektedir.

$$0 \leq P_{t\omega}^{Gl,Al} \leq (1 - \psi) * P_{t\omega}^{G0,Al,max} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{Gl,Sat} \leq \psi * P_{t\omega}^{G0,Sat,max} \quad (27)$$

Eşitlik (28) ve (29), şebeke ile ana şebeke arasında gerçekleşen güç işleminin, pozitif ve negatif sapma değişkenleri ile ayarlanabilen programlanan değerden sapabileceğini belirtmektedir. Bu hesaplama sürecinde yer alan kısıtlamalar aşağıdaki gibidir:

$$\Delta P_{t\omega}^{Gl,Al} = \Delta P_{t\omega}^{Gl,Al,+} - \Delta P_{t\omega}^{Gl,Al,-} \quad (28)$$

$$\Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat} = \Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat,+} - \Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat,-} \quad (29)$$

Eşitlik (30)-(33), (28) ve (29)'daki değişkenler için sapmaların sınırlarını belirler.  $\vartheta$  ve  $\rho$  ikili değişkenleri, sırasıyla piyasadan elektrik satın alma ve piyasaya satma senaryolarına ilişkin sapmaların yönünü tanımlar.

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{Gl,Al,+} \leq (1 - \vartheta) * P_{t\omega}^{Gl,Al} \quad (30)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{Gl,Al,-} \leq \vartheta * P_{t\omega}^{Gl,Al} \quad (31)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat,+} \leq (1 - \rho) * P_{t\omega}^{Gl,Sat} \quad (32)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{Gl,Sat,-} \leq \rho * P_{t\omega}^{Gl,Sat} \quad (33)$$

Son olarak Eşitlik (34) ve (35), yine ilk aşamadaki Eşitlik (14) ve (15)'teki mantıkla, bu kez gerçek zamanda talep tarafı rezervlerinin konuşlandırılması için üst ve alt sınırları belirlemektedir.

$$0 \leq R_{t\omega}^{DE,Y} \leq R_t^{TT,Y} \quad (34)$$

$$0 \leq R_{t\omega}^{DE,A} \leq R_t^{TT,A} \quad (35)$$

### 2.2.1. Belirsizliklere İlişkin Senaryo Seçimi

Stokastik programlama tabanlı problemlerde belirsizliklerin daha izlenebilir olması ve olası tüm olayları kapsaması için çok sayıda senaryo üretilmeli ve daha sonra senaryo sayıları azaltılmalıdır [14,15]. Başka bir deyişle, Monte Carlo tabanlı senaryo oluşturma yaklaşımının çıktılarını gibi çok sayıda senaryonun ele alındığı durumlarda senaryo indirgeme yaklaşımı esastır [16].

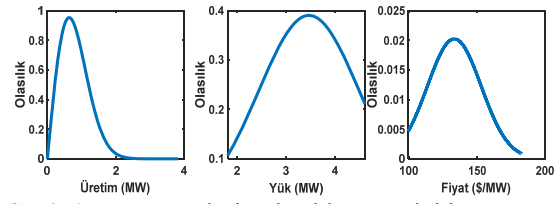
Monte Carlo simülasyon yöntemi, belirsizlik faktörünün olduğu durumlarda ve simülasyon çalışmalarında bir veya daha fazla olasılık dağılımından rasgele sayıların seçilmesi tekniğidir. Monte Carlo simülasyonu, model için belirlenen aralık sayısına bağlı olarak binlerce hatta on binlerce veriyi kapsayabilir. Yüzlerce deney yapmadan veya binlerce örnek oluşturmadan performansı tahmin etmeye izin verir. Yöntemin bir probleme uygulanması, problemin rastgele sayılar kullanılarak simüle edilmesi ve bu simülasyonların sonuçlarına bakılarak hesaplanacak parametrenin yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanmaktadır. Böylece, farklı olasılık fonksiyonları, bir dizi rasgele sayı kullanarak model içinde farklı sonuçları hesaplar.

Bu aşamada ele alınacak olan, belirsizlikler dahilinde, senaryoların oluşturulmasında, piyasa fiyatı, yük, rüzgar hızı ve güneş enerjisi üretimi gibi belirsizlik faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu faktörlerin tarihsel verilerine dayanarak, Monte Carlo simülasyon yöntemi ile çok sayıda senaryolar oluşturulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak olasılık uzaklık fonksiyonunun hesaplamaları kullanılmış ve her bir belirsiz parametreye olasılık uzaklığı atanmıştır. Burada yük ve fiyat parametreleri için normal dağılım, üretim parametreleri için weibull dağılımı kullanılmaktadır.

Hesaplanan olasılık mesafeleri Monte Carlo simülasyonu [17,18] motoruna verilmiş ve çoklu senaryolar üretilmiştir. Monte Carlo simülasyon motorundan üretilen senaryolar daha sonra aynı grup içinde en yakın olasılıklara sahip olasılık uzaklık algoritmasına göre indirgenmiştir. Monte Carlo simülasyonu tarafından üretilen çok sayıda senaryo daha sonra aynı grup içinde en yakın olasılıkları sunmak için olasılık uzaklığı algoritmasına göre indirgenmiştir [16,19]. Sonuçta en yakın olasılıkların aynı grupta toplandığı olasılık paketi oluşturulmuştur. Şekil 1'de, güneş enerjisi üretiminin, şebeke yükünün ve piyasa fiyatının olasılık yoğunlukları yer almaktadır.

Ortaya çıkan senaryolar, uygun kısıtlamaları dikkate alan stokastik doğrusal programlama modelinde kullanılmıştır. Böylece stokastik bilgi

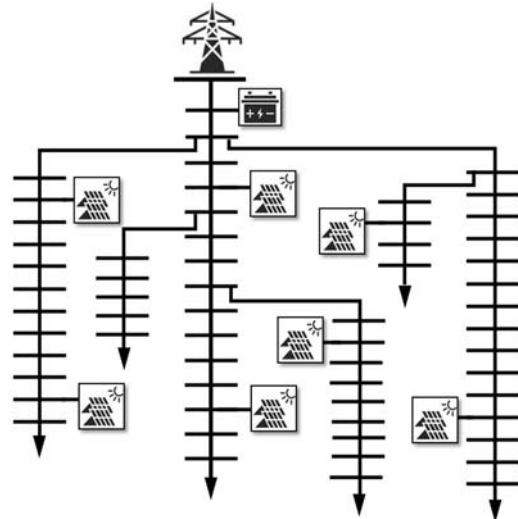
mümkün olduğunca sağlam kalırken optimizasyon problemi de izlenebilir hale getirilmiştir. Olasılık dağılım fonksiyonu ve Monte Carlo simülasyonu yöntemleriyle belirsizlik parametreleri ele alınan model, daha sonra Genel Cebirsel Modelleme Sisteminde (GAMS) karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (MILP) olarak kodlanmış ve CPLEX çözücü kullanılarak çözülmüştür.



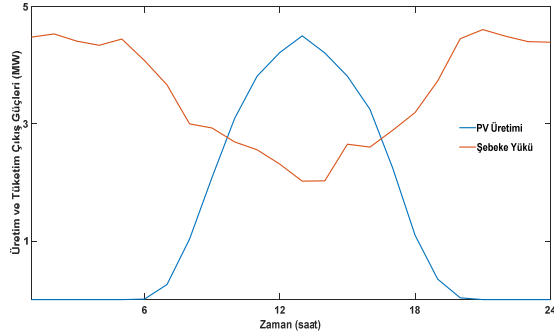
Şekil 1. Parametrelerin olasılık yoğunlukları

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Problemin çözümüne yönelik simülasyon çalışmaları, Türkiye'de yer alan bir elektrik dağıtım şebekesinin seçili bir pilot fideri üzerinde ve gerçek verilere dayanarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen fider 61 baraya sahiptir ve sistemin gerilim seviyesi 31,5 kV'tur. Kurulu güç güneş enerjisi santralleri için 5,94 MWp, diğer yükler için 10,6 MW iken, batarya enerji depolama sistemi için şarj ve deşarj güçleri 2 MW kabul edilmiştir. Seçili fiderin tek hat şeması Şekil 2'de sunulmaktadır.



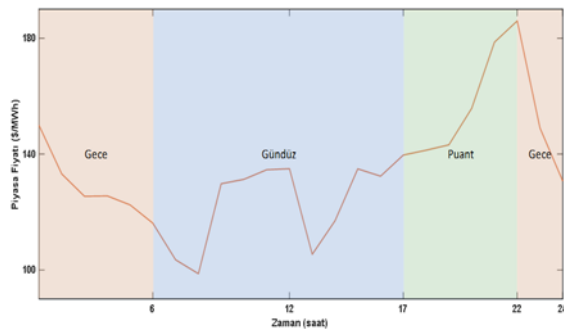
Şekil 2. Pilot fider tek hat şeması



Şekil 3. Güneş enerjisi üretimleri ve şebeke yükleri

Analizlerde ele alınan, elektrik piyasalarında enerji depolama kullanarak işletim sağlayacak elektrik dağıtım sistemi operatörü, şebekesine entegre halde bulunan güneş enerjisi santralleri ve şebeke yükleriyle birlikte işletimi, minimum işletme maliyetiyle optimize etmektedir.

Gerçekçi bir yük profili, güneş enerjisi üretim profili ve enerji fiyatını dikkate almak için 2022 yılının temmuz ayının verilerinin ortalaması alınarak istatistiksel analizi yapılmıştır. Piyasa fiyatlarına dair gerçek veriler ise EPIAŞ (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) Şeffaflık Platformu'ndan alınmıştır. Şekil 3'te edinilen güneş enerjisi üretimi ile şebeke yükü, Şekil 4'te ise gün öncesinde belirlenen enerji piyasa fiyatı verileri, gündüz, puant ve gece tarife dönemleri halinde sunulmaktadır. Sistemin tablo halindeki puant yük değerleri ise Çizelge 1'de sunulmaktadır.



Şekil 4. Enerji piyasa fiyatları

Çizelge 1. Sistem puant-yük verileri

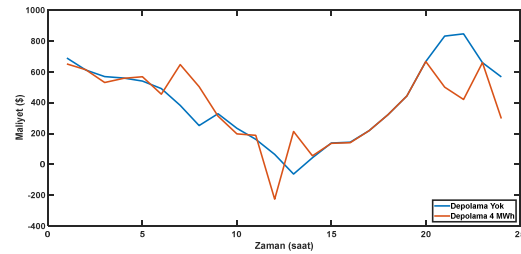
Zaman	Puant Yük (MW)	Zaman	Puant Yük (MW)
t1	4.477	t13	2.020
t2	4.531	t14	2.024
t3	4.409	t15	2.650
t4	4.336	t16	2.601
t5	4.442	t17	2.884
t6	4.079	t18	3.192
t7	3.664	t19	3.728
t8	2.996	t20	4.450
t9	2.926	t21	4.604
t10	2.688	t22	4.493
t11	2.554	t23	4.400
t12	2.313	t24	4.387

Enerji depolamaya ilişkin veriler ise Çizelge 2'de sunulmuştur. Veriler varsayımsal olarak oluşturulmuş ve depolama olarak pilin kullanıldığı varsayılmıştır. Depolama tesisinin şarj/deşarj verimliliği %90 olarak kabul edilmiştir. Burada yer alan  $E_{max}$  bataryanın MWh cinsinden enerji kapasitesini,  $P_{max}$  MW cinsinden bataryanın sırasıyla şarj vedeşarj gücünü,  $SoC_{max}$  ise bataryanın şarj durumunu ifade etmektedir.

Çizelge 2. Depolama teknik verileri

Birim	$E_{max}$ (MWh)	$P_{max}$ (MW)	$SoC_{max}$ (%)
Batarya	4	2	90

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, sisteme enerji depolama entegre edildiği ve edilmediği koşullar arasındaki işletme maliyeti farkını görebilmek adına bu iki farklı durumlar dahilinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te sistemde depolama bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda elde edilen işletme maliyetleri gösterilmektedir.



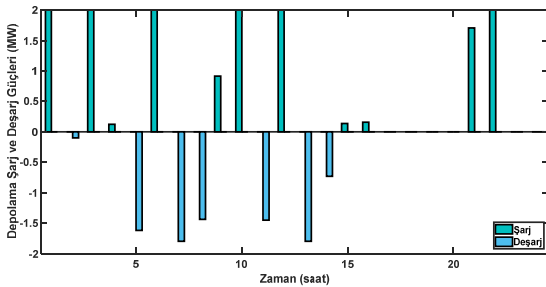
Şekil 5. Depolamalı ve depolamasız durumlarda hesaplanan işletme maliyetleri

**Çizelge 3.** İşletme maliyetleri ve farkları

Depolama yokluğunda maliyet (\$)	Depolama varlığında maliyet (\$)	Maliyet farkı (\$)
9707.5038	9028.6983	678.8054

Edinilen sonuçlara göre enerji depolama sisteminin eğilimi, uygun fiyatlı enerji kaynağı olarak öncelikli yerel enerji kaynağını kullanıp karını maksimize etmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi üretimi çıkışı şebeke yükünden daha fazla olduğunda açığa çıkmış fazla enerji, depolama sistemi tarafından şarj olmakta; şebeke yükü güneş enerjisi üretim çıkışından daha fazla olduğunda ise depolama sistemi tarafından enerji deşarjı yapılarak enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılmaktadır. Böylece yukarı yönlü elektrik piyasalarından, piyasa fiyatlarının yüksek olduğu seviyeden alım yapılmayıp ekonomik yönden avantajlı bir durum sağlanabilmektedir.

Çizelge 3, dağıtım sisteminin depolama entegre edilip edilmediği durumlardaki işletme maliyetlerini ve aralarındaki farkları göstermektedir. Pik tüketim saatleri de dâhil olmak üzere yazın güneş enerjisi kaynaklı üretim üstünlüğü toplam işletme maliyetini düşürmektedir. Böyle bir ekosistemde sisteme enerji depolama sisteminin de dâhil edilmesiyle işletme maliyeti daha da düşmüştür. Batarya enerji depolama sisteminin optimizasyon ufku boyunca devreye girdiği ve şarj-deşarj olduğu zaman dilimlerini ve çıkış güçlerini içeren grafik, Şekil 6'ta sunulmuştur.

**Şekil 6.** Batarya depolama sisteminin güç değişimi

Burada batarya enerji depolama sisteminin yatırım ya da işletim maliyeti ile ilgili olarak, bataryanın dağıtım sistemi operatörünün mülkiyetinde olduğu

ve dağıtım sistemi operatörünün bunun işletimini kendi faydası için optimize ettiği varsayılmaktadır. Bu nedenle, depolama sistemi için herhangi bir fazladan maliyet düşünülmemiştir. Çalışmanın ana odağı kısa vadeli işletme maliyeti olduğu için, batarya enerji depolama sistemi yaşlanması gibi uzun vadeli maliyetler amaç fonksiyonuna dâhil edilmemiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, elektrik piyasalarında enerji alışverişi işlemi yapan bir dağıtım sistemi operatörünün, gerçekleştireceği işlemlerle işletme maliyetini minimize eden, stokastik programlamaya dayalı optimal işletim yaklaşımı geliştirilmiştir. Yaklaşım, üretimlerin ve yüklerin gün öncesinde konuşlandırılmasını ve gerçek zamanlı işletimde şebekenin çift yönlü güç akışına ilişkin süreçlerde planlanmasını kapsamaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, dağıtım sisteminin seçili bir pilot fideri üzerinde depolamanın olup olmadığı durumlar altında yürütülmüştür. Tamamen gerçek verilere dayalı yenilenebilir enerji çıkış gücü, şebeke yükü ve elektrik fiyatı belirsizliklerinin sistematik bir çerçevede ele alınarak hesaplanan işletme maliyetleri, bu çalışmanın en önemli motivasyonlarından biridir.

Edinilen bulgular, yenilenebilir üretim kaynaklarının entegre halde bulunduğu çift yönlü enerji akışına sahip elektrik dağıtım sistemlerinde enerji depolama kullanımının optimal planlamasının, işletme maliyetlerini en aza indirmek için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Entegrasyonu hızla artan yenilenebilir enerji kullanımının daha ekonomik ve güvenilir bir moda haline gelmesini sağlayacak olan geleceğin enerji sistemlerinde enerji depolama sistemleri çok önemlidir. Bu minvalde gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları, dağıtım sistemi operatörlerine, minimum işletme maliyeti elde etmek için enerji depolama sisteminin nasıl programlanması gerektiği konusunda bir kılavuz olarak kullanılabilir. Ayrıca sunulan çerçevenin, ileride yürütülecek reel sistemlerin ekonomik optimizasyonlarının sağlanması çalışmalarına ışık tutacağı öngörülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Koochi-Fayegh, S., Rosen, M.A., 2020. A Review of Energy Storage Types, Applications and Recent Developments. *Energy Storage*, 27, 101047.
2. Chamandoust, H., Derakhshan, G., Hakimi, S.M., Bahramara S., 2020. Tri-objective Scheduling of Residential Smart Electrical Distribution Grids with Optimal Joint of Responsive Loads with Renewable Energy Sources. *Energy Storage*, 27, 101112.
3. Jing, W., Lai, C.H., Ling, D.K.X., Wong, W.S.H., Wong, M.L.D., 2019. Battery Lifetime Enhancement Via Smart Hybrid Energy Storage Plug-in Module in Standalone Photovoltaic Power System. *Energy Storage*, 21, 586-98.
4. Shao, Z., Wakil, K., Usak, M., Amin Heidari, M., Wang B., Simoes, R., 2018. Kriging Empirical Mode Decomposition Via Support Vector Machine Learning Technique for Autonomous Operation Diagnosing of CHP in Microgrid. *Appl Therm Eng*, 145, 58-70.
5. Moutis, P., Hadi Amini, M., Khan, I.A., He, G., Mohammadi, J., Kar, S., 2019. A Survey of Recent Developments and Requirements for Modern Power System Control. *Pathways to a Smarter Power System*. Elsevier Ltd., 289-316
6. Malekpour, A.R., Niknam, T., 2011. A Probabilistic Multi-Objective Daily Volt/Var Control at Distribution Networks Including Renewable Energy Sources. *Energy*, 36(5), 3477-3488.
7. Tan, K.M., Babu, T.S., Ramachandaramurthy, V.K., Kasinathan, P., Solanki, S.G., Raveendran, S.K., 2021. Empowering Smart Grid: A Comprehensive Review of Energy Storage Technology and Application with Renewable Energy Integration. *Energy Storage* 39, 102591.
8. Li, Y., Yang, Z., Li, G., Zhao, D., Tian, W., 2019. Optimal Scheduling of an Isolated Microgrid with Battery Storage Considering Load and Renewable Generation Uncertainties. *IEEE Trans Ind Electron*. 66(2), 1565-1675.
9. Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., Moeni-Aghtaie, M., 2017. A Stochastic Multi-Objective Framework for Optimal Scheduling of Energy Storage Systems in Microgrids. *IEEE Trans Smart Grid*, 8(1), 117-27.
10. Raghavan A., Maan P., Shenoy A. 2016. Optimal Scheduling of Energy Storage for Renewable Energy Distributed Energy Generation System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1100-1107.
11. Wang, Y., Zhao, J., Zheng, T., Fan, K., Zhang, K., 2022. Optimal Planning of Integrated Energy System Considering Convertibility Index. *Energy Res*. 10, 1-17.
12. Ho, W.S., Macchietto, S., Lim, J.S., Hashim, H., Muis, Z.A., Liu, W.H., 2016. Optimal scheduling of energy storage for renewable energy distributed energy generation system. *Renew Sustain Energy Rev.*, 58, 1100-7.
13. Zhang, X., Son, Y., Choi, S., 2022. Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems and Demand Response for Distribution Systems with High Penetration of Renewable Energy Sources. *Energies*. 15(6).
14. Teimourzadeh, S., Tor, O.B., Cebeci, M.E., Bara, A., Oprea S.V., Kisakurek, S.M., 2020. Enlightening Customers on Merits of Demand-Side Load Control: A Simple-But-Efficient-Platform. *IEEE Access*, 8, 193238-47.
15. Gholami, A., Shekari, T., Aminifar, F., Shahidehpour, M., 2016. Microgrid Scheduling with Uncertainty: The Quest for Resilience. *IEEE Trans Smart Grid*, 7(6), 2849-2858.
16. Teimourzadeh, S., Tor, O.B., Cebeci, M.E., Bara, A., Oprea, S.V., 2019. A Three-Stage Approach for Resilience-Constrained Scheduling of Networked Microgrids. *Mod Power Syst Clean Energy*, 7(4), 705-715.
17. Binder, K., 2005. *Monte-Carlo Methods. Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics*. Cambridge University, 51-208.
18. Kroese, D.P., Rubinstein, R.Y., 2012. *Monte Carlo methods*. Wiley Interdiscip Rev Comput Stat., 4(1), 48-58.
19. Conejo, A.J., Carrión, M., Morales, J.M. 2010. *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*. New York: Springer. 1, 27-61.

**KISALTMALAR**

$\lambda^{GÖ,Al}$	Gün öncesi elektrik alış fiyatı	$\Delta P^{Gl,Sat}$	$P^{Gl,Sat}$ , 'nin toplam sapması
$\lambda^{GÖ,Sat}$	Gün öncesi elektrik satış fiyatı	$\Delta P^{Gl,Al,+}$	$P^{Gl,Al}$ , 'nin pozitif sapması
$\lambda^{TT,Y}$	Talep tarafı yukarı yönlü yedek rezerv fiyatı	$\Delta P^{Gl,Al,-}$	$P^{Gl,Al}$ , 'nin negatif sapması
$\lambda^{TT,A}$	Talep tarafı aşağı yönlü yedek rezerv fiyatı	$\Delta P^{Gl,Sat,+}$	$P^{Gl,Sat}$ , 'nin pozitif sapması
$\lambda^{Gl,Al,+}$	Gün içi elektrik alış fiyatı pozitif sapması	$\Delta P^{Gl,Sat,-}$	$P^{Gl,Sat}$ , 'nin negatif sapması
$\lambda^{Gl,Al,-}$	Gün içi elektrik alış fiyatı negatif sapması	$P^{GES}$	Güneş enerji santrali üretim çıkış gücü
$\lambda^{Gl,Sat,+}$	Gün içi elektrik satış fiyatı pozitif sapması	$P^{Yük}$	Şebeke yük çıkış gücü
$\lambda^{Gl,Sat,-}$	Gün içi elektrik satış fiyatı negatif sapması	$P^{Bat,+}$	Batarya enerji depolama şarj gücü
$\lambda^{TD,Y}$	Talep tarafı yukarı yönlü yedek rezerv dağıtım fiyatı	$P^{Bat,-}$	Batarya enerji depolama deşarj gücü
$\lambda^{TD,A}$	Talep tarafı aşağı yönlü yedek rezerv dağıtım fiyatı	$P^{YAT}$	Kesinti yapılan aktif güç
$R^{TT,Y}$	Talep tarafı yukarı yönlü yedek rezerv miktarı	$\eta^{Bat}$	Batarya verimliliği
$R^{TT,A}$	Talep tarafı aşağı yönlü yedek rezerv miktarı	$E^{Bat}$	Batarya kapasitesi
$R^{TD,Y}$	Talep tarafı yukarı yönlü yedek rezerv dağıtım miktarı	SoC	Batarya şarj durumu
$R^{TD,A}$	Talep tarafı aşağı yönlü yedek rezerv dağıtım miktarı	$\pi$	Senaryo olasılığı
$\lambda^{YAT}$	Yük atma fiyatı	$\omega$	Senaryo indeksi
$P^{GÖ,Al}$	Gün öncesi satın alınan güç miktarı	$\sigma, \alpha, \zeta, \psi, \vartheta, \rho$	İkili değişkenler (0/1)
$P^{GÖ,Sat}$	Gün öncesi satılan güç miktarı		
$P^{GÖ,DS}$	Gün öncesi aktif güç işlemi miktarı		
$P^{Gl,Al}$	Gün içi satın alınan güç miktarı		
$P^{Gl,Sat}$	Gün içi satılan güç miktarı		
$P^{Gl,DS}$	Gün öncesi aktif güç işlemi miktarı		
$\Delta P^{Gl,Al}$	$P^{Gl,Al}$ , 'nin toplam sapması		





## The Use of the Hingedan (*Ferula pseudalliacea*) in the Production of Functional Gluten-Free Biscuits

Sezen ÖZÇELİK\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-2846-2226  
Rojbin GÖR<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6035-3850

<sup>1</sup>Hakkari University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Hakkari, Türkiye

Geliş tarihi: 05.01.2024 Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ÖZÇELİK, S., GÖR, R., (2024). The Use of the Hingedan (*Ferula pseudalliacea*) in the Production of Functional Gluten-Free Biscuits. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 145-156.

### Abstract

In our study, gluten-free biscuits were produced to treat celiac disease using *F. pseudalliacea* Rech. f. plant at 5%, 10%, and 15% ratios. The physical, chemical, and sensory properties of the created biscuits were examined. In the research analyses, as the addition ratio of *F. pseudalliacea* increased, the diameter values varied between 30.90 to 61.59 mm, and thickness ranged from 13.42 to 13.83 mm. A decrease in cooking loss, textural properties, L\* and b\* values was observed, while an increase was determined in moisture, spread ratio, specific volume, and a\* values. In the sensory analysis, data results of the biscuits presented to the panellists indicated that, in terms of overall liking, the product with 5% *F. pseudalliacea* addition received the closest preference to the control group, suggesting that the 5% *F. pseudalliacea*-supplemented biscuit did not have a negative impact as stated by the panelists. Based on the evaluations and analyses, the substitution of *F. pseudalliacea* in gluten-free biscuit production was seen as an important result in terms of offering an alternative and acceptability.

**Keywords:** Functional food, Celiac disease, Cookie, *Ferula pseudalliacea*, Gluten

### Glutensiz Bisküvi Üretiminde Hingedan (*Ferula pseudalliacea*) Kullanımı

#### Öz

Çalışmamızda halk arasında çölyak hastalığında tedavi amaçlı tüketilen *F. pseudalliacea* Rech. f. bitkisi %5, %10, %15 oranlarında kullanılarak glutensiz bisküvi üretimi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bisküvilerin fiziksel, kimyasal ve duyuşal özellikleri incelenmiştir. Araştırma analizlerinde *F. pseudalliacea* ilave oranı arttıkça çap değerleri 30.90-61.59 mm, kalınlık 13.42-13.83 mm arasında değişmiştir. Pişme kaybı, tekstürel özellikleri, L\* ve b\* değerlerinde azalmalar gözlenmiş olup, nem, yayılma oranı, spesifik hacim ve a\* değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Duyusal analizde panelistlere sunulan bisküvilerin veri sonuçlarında genel beğeni olarak kontrol grubuna en yakın beğeni %5 oranında *F. pseudalliacea* ilaveli ürün olarak *F. pseudalliacea* %5 katkılı bisküvide olumsuz bir etki yaratmadığı panelistler tarafından belirtilmiştir. Değerlendirme ve analizler sonucunda *F. pseudalliacea* ikamesinin

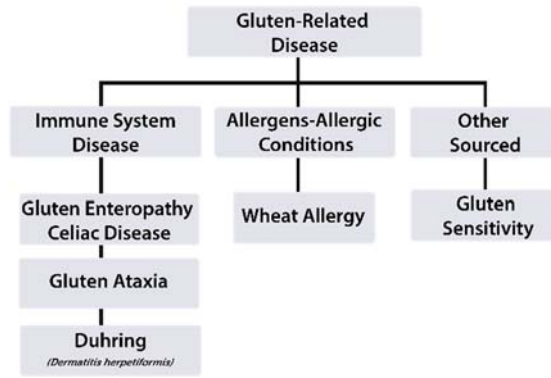
\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Sezen ÖZÇELİK, [sezenozcelik@hakkari.edu.tr](mailto:sezenozcelik@hakkari.edu.tr)

glutensiz bisküvi üretiminde alternatif olarak kullanılması ve kabul edilebilirliği önemli bir sonuç olarak görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Fonksiyonel gıda, Çölyak hastalığı, Bisküvi, *Ferula pseudalliacea*, Gluten

## 1. INTRODUCTION

Cereals and products in people's daily nutrition routines can cause certain ailments in individuals with sensitivity. Prolamins such as gliadin, secalin and hordein, which are sub-fractions of gluten proteins, can trigger certain ailments in people with gluten sensitivity after consumption. It has been stated that gluten proteins, which does not show absorption in the digestive system, has a toxic effect on the basis of these diseases [1]. Figure 1 shows the classification of gluten-related diseases.



**Figure 1.** Classification of gluten-related diseases [2]

Celiac disease is diagnosed with many findings which consists of reasons such as allergic conditions in breast milk intake, intake of gluten-containing foods at meals, excess daily amount of these products and malnutrition in eating habits; it is a disease characterized by hereditary and environmental interaction in the umma system [3]. The only treatment method to be applied to sick people with Celiac disease, which has no treatment yet, is the application of a gluten-free diet with gluten deficiency in the foods taken. Sick individuals who follow a gluten-free diet are in search of gluten-free products that will not cause

autoimmune damage [4]. In products created with gluten-containing raw materials, visco-elastic structure and desired texture and volume can be obtained in dough making. However, in products containing gluten-free raw materials in their formulation, the product's expected appearance and desired textural properties cannot be obtained due to the absence of gluten. To compensate for the gluten deficiency, starch, hydrocolloids and functional components are added as auxiliary components in the products [5,6]. Brands in the market are trying to develop products for celiac patients, gluten sensitivity or individuals who make gluten-free nutrition a life [7]. Generally, in developed functional products, gluten cannot be reduced to zero. For this reason, the maximum gluten content in the product is 20 ppm which is the determined and acceptable ratio [8]. Upon the functional food development of manufacturers, the content of products such as cakes, biscuits, wafers and cookies are created from gluten-free mixtures. By definition; sugar, edible salt, vegetable oils, raising agents, eggs, whey and milk powder, additives in the weight and content permitted by the legislation, starches obtained from different grains are mixed and a certain amount of water is added to it, shapes are formed from the dough rested for a while, cooked at a certain temperature and cooled, and then the bakery product consumed after 'double cooking' and 'becoit'. The functional product developed from the words is defined as biscuits [9]. All foodstuffs whose contents have been fortified, enriched, processed or improved have been used as functional foods beyond benefiting from basic nutrients.

Functional foods are known as functional because they provide nutritional availability and have multiple physiological effects [10]. Many scientists argue that foods on the market are fortified with some special nutrients before processing and,

therefore should be considered functional foods [11]. About 2500 years ago, Hippocrates described the relationship between nutrition and human health with the phrase "Let your medicine be your food and your food be your medicine". If we look at today, it has been observed that consumers tend to functional foods and food supplements due to the increase in diseases related to the heart, circulatory system obesity.

It is observed that functional foods provide additional health benefits to the consumer rather than providing nutrients [12]. The plant called Hingedan-Hegedan (*Ferula pseudalliacea*), edible in the region where it grows, has medicinal properties and aromatic composition, is a wild endemic species with a physical height of 50 cm and curly leaves. In the study conducted by Artuş, it was determined as a result of the analyzes that the hingedan plant has high bioactivity [13]. In the study conducted by Dastan et. al., in addition to the antiplasmodial and antibacterial properties of *Ferula pseudalliacea*, coumarin obtained from the isolated content of root extracts is a living natural antibacterial agent for the food and pharmaceutical industry [14], and Dastan et. al. found that the plant may be useful in the food and pharmaceutical industry as an antibacterial and antioxidant substance in the analysis of oils obtained from certain parts of this plant [15]. The study aims to use the *Ferula pseudalliacea* plant as a treatment for Celiac disease among people and to use it in the content of gluten-free flour mixtures in different proportions in the functional product to be created, and to benefit both with different tastes and nutritional properties, since it does not contain gluten, this mixture provides a new product advantage for celiac patients. It is thought that the content of the mixture will be highly preferred due to its nutritional and some medicinal properties. Hingedan grass is a plant that is in demand by the public because of its high nutritional value. The fact that hingedan has not yet been mixed with any product in the literature and used increases its original value. The study aims to provide a new functional food to the product range by developing a gluten-free biscuit with gluten-free Hingedan

(*Ferula pseudalliacea*) that celiac patients can easily consume.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1. Materials

The materials used in the study, rice flour (Başak Gıda- Konya), corn starch (Başak Gıda, Konya), granulated sugar (Bor Şeker, Niğde), shortening (Sana Dough- İstanbul), vanillin (Baghdad-Ankara), baking powder (Metro Chef- Adana), salt (Billur Iodized Salt, İstanbul) were obtained from local companies in Adana, and hingedan was generally found in all rural areas of the Hakkari region, but the most dense was supplied from the countryside of Marinüs (Kavaklı) Village. The water used as a component during production was provided from the mains water of Çukurova University Balcalı Campus. Guar gum (Ricol, Asr Kimya-Istanbul) and SSL (Artı Gıda Kimya-Istanbul) are used.

### 2.2. Method

Gluten-free biscuits with hingedans for celiac patients were produced in Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Grain Processing Technology Laboratory. The control group was formed by adding the ingredients (rice flour, corn starch, granulated sugar, shortening, vanillin, baking powder, salt, emulsifier, gum) to the mixing chamber in the amounts shown in Table 1. Due to the distinctive strong smell and taste of the hingedan plant, in preliminary trials, it was determined that adding the plant to biscuits at 5%, 10%, and 15% ratios would be the most suitable amounts in terms of palatability. The hingedan plant was collected from mountainous lands in Van-Hakkari provinces in May 2022, dried under sunlight for a period of 1 week, and stored in a dry place (+4 °C) without light. The preserved hingedan plant was milled for 30 seconds using a Spice-Herb Grinder brand laboratory grinder with a capacity of 3500 W and 1250 gr.

**Table 1.** Biscuit dough ingredient quantities (g)

Biscuit constituent components	Control (gr)	5% Hingedan(gr)	10% Hingedan(gr)	15% Hingedan(gr)
Rice flour	21.09	21.09	21.09	21.09
Cornstarch	21.09	21.09	21.09	21.09
Granulated sugar	25.31	25.31	25.31	25.31
Margarine	16.87	16.87	16.87	16.87
Vanillin	0.84	0.84	0.84	0.84
Baking powder	0.63	0.63	0.63	0.63
Salt	0.42	0.42	0.42	0.42
SSL	0.21	0.21	0.21	0.21
Guar gum	0.84	0.84	0.84	0.84
Hingedan	0	2.10	4.2	6.32
Water	12.65	12.65	12.65	12.65

The components were added to the mixing chamber of the 'Kitchen Aid' Artisan brand 4.8 L capacity mixing machine and the dough-making process was carried out by mixing for 1 minute in the 1st cycle, 4 minutes in the 2nd cycle and a total of 5 minutes. As the addition rate of the ingenious grass increases, the dough cannot be shaped and clumps are observed. After resting the dough at +4 °C for 10 minutes, 200 gr balls were made and a smooth and inclined surface was formed with the help of rollers based on AACC method 10-54.01, and then 3 different formulations with 1 control group and 2 iterations were developed by forming a shape with 6 cm wide cookie molds. It was baked in 'FIMAK' brand 'EKF' a 60.80' model oven for 22 minutes with a lower temperature of 150 °C and an upper temperature of 200 °C. The biscuits obtained were left to cool for 1 hour and then analyzed.

## 2.2.1. Analysis of Biscuits

### 2.2.1.1. Weight and Cooking Loss

Measurements were recorded by weighing the biscuits on a precision scale before and after baking. The dough weight (A) and post-baking biscuit weight (B) of the six recorded biscuits were measured and formulated as A-B/A. These ratios were averaged.

### 2.2.1.2. Volume and Specific Volume

The volume analysis using rapeseed, which is based on the displacement method, was measured using

six biscuits. The data obtained were divided by the number of samples and the volume of the biscuit was determined. The measurement of the specific volume was calculated by dividing the volume data by the weight data of the same samples [16].

### 2.2.1.3. Diameter, Thickness and Spread Ratio

AACC Standard Method No. in Biscuits: Based on 10-54, measurements were made with a 0.001 mm Mitutoyo, Minoto K-4 digital caliper. Measurements are made by measuring the diameter and thickness in mm; The spread rate was calculated by rationing the diameter (mm) value of the biscuits to the thickness (mm) value [17].

### 2.2.1.4. Color Analysis

Color analysis was recorded in the biscuit by determining the L\*, a\* and b\* values with a Konica Minolta CM CR-400 model, 1.5 V (Japan) handheld color device. After baking, 3 points were determined from the outer surface of the biscuits, which were left to cool for 1 hour, and color measurement was made. Biscuit CIE color values are L\*, a\* and b\* with 3 misses;

L\*=100 (white), L\*=0(Black) lightness-darkness of the biscuit,  
a\*=red (High positive), a\*=green (High negative),  
b\*=yellow (high positive), b\*=blue (high negative).  
a\* and b\* values provide information about color size or position [18].

### 2.2.1.5. Moisture Analysis

In the biscuit samples, after resting for 1 hour after baking, the numbered containers were weighed by taking the tare of the numbered containers. The weighed samples were kept in an oven at 105 °C for 24 hours to come to constant weighing. At the end of 24 hours, the samples were re-weighed and the weight loss of the biscuits was recorded and the moisture content (%) was calculated [17].

### 2.2.1.6. Texture Analysis

These analyzes are important in terms of the mechanical properties of the food, as information about consumer taste, sales, processing, transportation and storage of the product is given by determining the textural properties of the foods. After the biscuits were left to cool for 4 hours, the hardness (breaking force) was determined based on the AACC 74-09 method. The texture properties of the biscuit were determined by using the 3-point fracture method to determine the hardness (N) and brittleness (mm) values with the help of the TA-XT Plus Stable Micro Systems device [19].

### 2.2.1.7. Sensory Analysis

To determine the sensory properties and consumability of the gluten-free hingedan biscuits produced, 45 panellists, 25 of whom are women and 20 are men, between the ages of 25-60 with the title of doctorate. The panellists were given a brief

briefing on the hingedan plant. Biscuits were randomly numbered with codes 136, 493, 572 and 613 and presented for evaluation under bright room conditions at the Sensory Analysis Laboratory of the Department of Food Engineering at Çukurova University. It was carried out by using the hedonic test form by applying to the hedonic test form by evaluating a score from 1 to 5, 1 being very bad and 5 being very good, over 7 different parameters as hardness, crispness, color, surface appearance, taste, general taste and smell in biscuits (tA).

### 2.2.1.8. Statistical Analysis

The data obtained from the control groups and the biscuits with *F. pseudalliacae* additives were evaluated with the help of the SPSS 25.0 statistical program ( $P < 0.05$ ). Whether there was a significant difference between the groups was determined by ANOVA and TUKEY-DUNCAN comparison tests.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, it was aimed to produce biscuits suitable for the consumption of Celiac patients and individuals with gluten sensitivity by creating a gluten-free biscuit formulation and adding 5%, 10% and 15% *F. pseudalliacae* plant to it. For this purpose, the moisture, physical, texture and sensory qualities of gluten-free biscuits with different proportions of *F. pseudalliacae* were confirmed.

**Table 2.** Analyses conducted on the biscuit

Analysis	Control	5% Hingedan	10% Hingedan	15% Hingedan
Moisture (%)	9,58	11,26	11,60	10,95
Diameter (mm)	61,55	60,90	61,48	61,59
Thickness (mm)	13,83	13,42	13,55	13,50
Spread rate	4.47	4.53	4.53	4.57
Baking Loss(%)	14,52	11,04	12,06	12,60
Specific Volume Cm <sup>3</sup> /gr)	1,84	2,35	2,46	2,21
Texture Hardness (N)	138,31	91,49	78,67	88,90
Texture Fragile (mm)	12,14	11,35	11,41	11,63
L*	73,35±20.04	61,00±0.58	56,00±0.60	52,66±0.75
a*	-0.90±0.35	-0.35±0.18	0.26±0.22	0.57±0.15
b*	20.16±1.09	18.75±0.43	17.00±0.37	15.52±0.24

### 3.1. Moisture

Chinma et. al., found that the moisture rates of the biscuits they produced by adding peanuts to germinated millet and bambara were found to be between 8.12-8.63 g; The high humidity levels have been attributed to the high-water absorption capacity of the proteins in the content of bambara peanuts [20]. Oliveira et. al., the moisture values of gluten-free biscuits obtained by adding a mixture of —Guaranal and —Catubal plants, which are medicinal plants added to rice flour at a rate of 4%, were found to be 2.68% and 2.65% [21]. In our study, it was observed that the moisture content of the biscuit samples increased (Table 2). It was determined that the control group product had lower moisture content compared to the biscuits with *F. pseudalliacea* added. This may be associated with the low water absorption capacity of biscuits with *F. pseudalliacea*. According to the findings of the POST-HOC TUKEY HSD test, which was performed to determine which groups the difference was between the two groups, a statistically significant difference was found between the humidity values of K1 and B1 P=0.001, O1 P=0.000, and OB1 P=0.009.

### 3.2. Diameter

In his study on gluten-free biscuits, Kunt added buckwheat flour, chickpea flour, carob flour and transglutaminase and sodium alginate to the formulation to increase the nutritional value of the biscuit and to improve the structure of the biscuit [22]. The diameter values obtained from the samples varied between 60.20-64.30 (Table 2). It was observed that the biscuits obtained with the addition of transglutaminase to the formulation with chickpea flour gave the highest diameter value. In gluten-free biscuits, the addition of chickpea flour increased the biscuit diameter, while carob flour decreased it. Doğan produced gluten and gluten-free biscuits in which rhubarb was added at different ratios (0, 0.5, 1, 2). The diameter values of gluten biscuits varied between 56.49-58.15 mm, while the diameter values of gluten-free biscuits varied between 49.50-56.23 mm. It was determined that the diameter value decreased as the rhubarb content increased in gluten biscuits. It was thought that the

diameter value decreased as the ratio increased due to the fiber content of the rhubarb plant. There was a difference in the diameter values of gluten-free biscuits, and this difference was explained to be due to the linear quadratic effect between rhubarb and gum [23]. In this study, it was observed that the diameter ratio decreased in biscuits to which *F. pseudalliacea* was added at 5% and increased in biscuits to which *F. pseudalliacea* was added at 10% and 15%. Analysis of variance was used to test whether there was a significant difference between the diameter averages of more than two samples.

### 3.3. Thickness

In the gluten-free biscuit study created for the consumption of celiac patients, biscuits were produced by adding 10, 20, 30 % almond flour and 25, 50 % stevia to the mixtures in which rice flour was used as 100%, 90, 80.7 0. The thickness values obtained as a result of the study analysis were recorded as 0.81-0.83-0.86 cm for biscuits with rice flour and stevia, 0.82-0.85-0.86 cm for biscuits with 10% almond flour and stevia, 0.83-0.85-0.97 cm for biscuits with 20% almond flour and stevia, and 0.84-0.86-0.98 cm for biscuits with 30% almond flour and stevia. It was observed that the biscuits with almond flour and stevia addition had the highest thickness ratio. It is thought that the increase in thickness values is related to the increase in bulk density of almond flour and stevia [24]. Singh et. al., observed a decrease in the thickness values of the biscuits with the substitution of water chestnut flour obtained at the end of many pretreatments at the rates of 50%, 60, 70, 80, 90% into the biscuit mixture [25], while in our study; the ratios of the thickness values of the biscuits ranged between 13.83-13.42 mm., shown that in Table 2. Accordingly, the highest average was 13.83 mm in the K1 group and the smallest average was 13.42 mm in the B1 group.

### 3.4. Spread Ratio

Olawoye et. al., studied the effects of biscuit starch resistance, glycemic load and glycemic index depending on baking temperature and time by adding Cardaba banana flour to gluten-free cookie combination. The spread rates, calculated by

dividing the width ratio of the cookies by the thickness ratio, varied between 5.46-6.23. It has been observed that the product with the highest spread rate in gluten-free biscuits that have undergone a certain temperature and duration of baking is formulated biscuits. Here, it is stated that the rate of spread varies depending on the starch in the Cardaba banana [26]. Olojede et. al., investigated the effect of sourdough in gluten-free bakery products by adding different starter cultures to acha flour-substituted gluten-free cookie dough. Used *F. fructivorans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis* starter cultures are added to the cookie dough by making single, double, or triple mixtures. It was observed that the highest spread rate in the cookie dough was in the biscuit in which *F. fructivorans* culture was used alone, and the lowest spread rate was in the cookie obtained from the triple combination of *F. fructivorans*, *C. glabrata*, *C. tropicalis*. It has been stated that the variability of these values in the spread rate is due to the fermentation feature of sourdough [27]. Considering the spread rates of *F. pseudalliacea*-added gluten-free biscuits produced in our study, the group with the highest value was OB1 4.57 and the group with the smallest spread rate was K1 4.47. The results of the analysis of the spread rate obtained by adding *F. pseudalliacea* grass, which was used at different rates in the study, to biscuit samples are as follows; The control group (K1) was 4.47, B1 was 4.53 with 5% *F. pseudalliacea* content, O1 with 10% *F. pseudalliacea* was 4.53, and 15% *F. pseudalliacea* was 4.57 (Table 2).

### 3.5. Baking Loss

In a study, it was observed that as the addition rate of the hydrocolloid concentration added to gluten-free biscuits increased, the baking losses decreased. This situation in biscuits has been associated with an inverse correlation between moisture and cooking loss, and as the rate of hydrocolloid addition increases, the removal of free water is prevented and a decrease in baking losses occurs [2]. According to the data obtained from the gluten-free biscuits created in our study, the highest baking loss rate was 14.52% in the K1 group, while the lowest average was 11.04% in the B1 group.

### 3.6. Specific Volume

Maria et. al., aimed to investigate the function of proteins added to famous products on the rheological and quality properties. For this purpose, they created gluten-free cakes and biscuits. Biscuits were produced using different protein sources such as soy, casein, pea, and egg white protein. In the specific volume values of the biscuits obtained, it was observed that the specific volume ratios of biscuits created separately from soy, casein, and pea significantly increased, while this value did not change in the biscuit with added egg white. In the specific volume values of biscuits obtained by using soy, casein, pea and egg white protein as different protein sources; it was observed that the specific volume ratios of biscuits created separately from soy, casein and peas increased significantly, and this value did not change in biscuits with egg whites [28]. In our study, the specific volume values in gluten-free biscuits vary between 1.84 and 2.46 cm<sup>3</sup>/gr. Accordingly, the O1 group with the highest specific volume average was recorded as 2.46 cm<sup>3</sup>/gr, while the smallest mean was found to be 1.84 cm<sup>3</sup>/gr in the K1 group. In a study, chocolate gluten-free biscuits were produced by using cassava starch, rice flour and soy flour instead of wheat flour. The specific volume analysis results of these samples were found to be in the range of 2.3-3.2 cm<sup>3</sup>/gr. The specific volume values of biscuits obtained from cassava and rice flour were lower than those obtained from soybean flour. This has been associated with a higher proportion of protein in the structure of soy flour than in the structure of other flours. It has been stated that flours containing high protein have larger volume products [29].

### 3.7. Hardness

The hardness values of gluten-free biscuits are shown in Table 2. Accordingly, the highest mean was recorded as 138.31 in the K1 groups, while the smallest mean was 78.67 in the O1 group. It was observed that the hardness rate decreased in the biscuits to which *F. pseudalliacea* was added at the rate of 5% (B1) and 10% (O1), and the hardness values of the biscuits added at the rate of 15%

increased compared to the other two products added. Whether there was a significant difference between the hardness values of more than two samples was tested by analysis of variance. According to the findings of the analysis, a statistically significant difference was found between the hardness values of the samples. The decrease in the hardness value of the biscuits with the addition of gluten-free *F. pseudalliacea* compared to the control group is thought to be the interactions that develop by creating a linear and quadratic effect with the other ingredients in the biscuit. Similar results were seen in the study conducted by Doğan [23].

### **3.8. Fragility**

Oliveira et. al., almond flour created by partially removing the fat of the by-product obtained from the extraction of Brazilian almond oil was evaluated by adding it to the formulation of gluten-free biscuits. The hardness and fragility values of the composition were observed in the cookie prepared by substituting 75 gr of almond flour used in 100 gr of wheat flour. It has been reported that this is related to increased fat content, fiber and phenolics, and decreased in carbohydrate content in 64 biscuit mechanics by replacing almond flour with wheat flour [30]. In our study, the fragility analysis results obtained by adding *F. pseudalliacea* grass, which was used in different proportions, to biscuit samples are as follows; The control group (K1) was 12.14, B1 with 5% *F. pseudalliacea* was 11.35, O1 with 10% *F. pseudalliacea* was 11.41, and OB1 with 15% *F. pseudalliacea* was 11.63. It is thought that the decrease in fragility or bite force value in biscuits with the addition of gluten-free *F. pseudalliacea* compared to the control group, and the inability of the margarine in the biscuit to bond with any gluten structure, reduce the fragility by creating a softer structure in the biscuit. Similar results were seen in the study by Laguna [31].

### **3.9. Sensory Properties**

In food science, it is known that the concepts of smell, taste, and many other senses in food form the

concept of flavor in the brain, and these mixed concepts formed in the brain provide impressions about food aroma, taste, and flavor [32]. In sensory analyses, consumers can form positive or negative opinions about the product based on the interaction of the final product with the sensory organs. In many academic studies, it has been determined that sensory interactions in consumers affect the perception of the product's sales and service. The appearance and aroma of the product before chewing, the hardness, softness, and mouthfeel during chewing are provided by sensory perception [33]. Although the gluten-free biscuits produced have superior health and nutritional features, they can sometimes be insufficient in sensory panels. Gluten-free substances can be harder, rougher and more difficult to chew in the mouth than gluten-containing equivalents [24]. In our study, although K136 received the highest score in the sensory evaluation of biscuits, the product adding of *F. pseudalliacea* at a rate of 5% received scores close to the control (Table 3). Farzana et. al., observed similar tending results in biscuits enriched with buckwheat flour [34]. Gülhan, produced gluten-free cakes by adding 10%, 20% and 30% lentil flour to gluten-free cake recipes. A study was conducted to investigate these cakes' dough properties, quality and sensory properties. In general, when the cake samples were evaluated, all samples received acceptable scores. The results obtained from the gluten-free cake samples prepared with the addition of 30% lentil flour were close to the control sample. Her research has suggested that cakes made with 30% lentil flour may be an alternative source for people with gluten sensitivity [35]. Han et. al., conducted a study on the production of gluten-free cookies for celiac patients. The study experimented with biscuits using 6 different legume flours (green and red lentils, chickpeas, yellow peas, kidney beans and kidney beans). After physical and nutritional examination, they reported that the cookies they produced were similar to those commercially available on the market [36]. The findings show that legumes can be used in product formulations.



**Table 3.** Sensory properties

Sample no	Number of samples	Hardness	Brittleness	Colour	Surface appearance	Taste	General likes	Odour
K136	12	3.92±1.3	3.67±1.37	4.00±1.65	4.42±0.99	4.17±1.11	4.33±0.88	4.17±1.52
B493	12	4.08±1.08	3.83±1.26	3.83±1.26	4.25±1.21	3.67±1.07	3.92±0.99	3.33±0.98
O572	12	3.83±1.26	3.50±1.44	4.00±0.85	4.08±1.37	3.25±0.96	3.50±1.31	3.00±0.95
OB613	12	3.67±1.67	3.42±1.62	3.50±1.24	3.75±1.13	2.83±1.52	3.00±1.27	2.42±0.90
Total	48	3.88±1.31	3.60±1.39	3.83±1.26	4.13±1.17	3.48±1.25	3.69±1.20	3.23±1.25

#### 4. CONCLUSION

In our study, the distinctive smell and taste of *F. pseudalliaca*, differing from the panellists' palate preferences, and the formation of a dark color in the product's appearance as the addition rate increased, have influenced the scores. The additional purpose of *F. pseudalliaca* being commonly used in folk medicine for celiac disease and the product being prepared specifically for celiac patients should be considered. Notably, none of the panellists were celiac patients it was their first time tasting this plant. At the end of the study, the biscuit with a 5% addition rate received scores close to the control group, suggesting that a product with varying proportions of *F. pseudalliaca*, achieved by reducing its levels and adding different ratios to the biscuit, could be developed for consumers based on taste and aroma preferences. In gluten-free biscuits made with the addition of *F. pseudalliaca*, an increase in the *F. pseudalliaca* addition rate was expected to increase in hardness values; however, a reverse correlation was observed, with this value decreasing with the addition rate. The highest hardness value was determined in the control group. The lowest brittleness value was observed in the biscuit with a 5% addition. One of the significant goals of our study is to produce gluten-free biscuits with the addition of *F. pseudalliaca*, commonly used in folk medicine for the treatment of celiac disease, for celiac patients and individuals with gluten sensitivity. The aim is to enrich and offer these biscuits to the consumers at an acceptable level. In the production of the gluten-free biscuits developed in this study, raw materials without gluten were used, and the *F. pseudalliaca* plant, which is used by many celiac patients for treatment purposes although not yet used as a medical treatment, was added. Biscuits that could be consumed by individuals with celiac disease and gluten sensitivity were produced. The products with

5% *F. pseudalliaca* addition showed values close to the control group regarding overall acceptability, indicating that the product gained functional properties and could be produced with positive health attributes. Many species of the *Ferula* genus have been used by humans for years as food and for medicinal purposes. *Ferula orientalis* is used as a flavoring agent in pickles, *F. hermonisbois* as a food supplement with aphrodisiac properties, and *F. assa-foetida*, derived from oleo-gum resin in Afghanistan, Iran, Nepal, India, and other Asian countries, is used as a spice. In Iran, where traditional medicine is prevalent, *F. assa-foetida* is used for the treatment of constipation, diarrhea, and abdominal pain. Similarly, it is indicated that underground and above-ground extracts of *F. gummosa*, *F. heuffelii*, and *F. communis* are used for preventing diarrhea, wound healing, coughs, asthma, muscle spasms, toothaches, gastric problems, and in the treatment of scorpion and snake bites [37]. Although the species *F. pseudalliaca* is used by the local people in the Hakkari region as a food supplement and to enhance the flavor of pickles, it is also used for the treatment of many diseases, especially celiac disease [38]. Taking all these into consideration, it is thought that investigating the medicinal properties of the *Ferula* plant in future studies and its use as an additional additive in functional foods will provide a significant contribution to the literature.

#### 5. ACKNOWLEDGE

In this study, I extend my sincere gratitude to Prof. Dr. Mehmet Sertaç ÖZER and Research Assistant Gamze Nil Boran YAZICI from the Faculty of Engineering, Department of Food Engineering at Çukurova University, who generously provided their assistance and valuable insights during both the experimental phase and through their thoughtful comments.

## 6. REFERENCES

1. Denery-Papini, S., Nicolas, Y., Popineau, Y., 1999. Efficiency and Limitations of Immunochemical Assays for the Testing of Gluten-Free Foods. *Journal of Cereal Science*, 30(2), 121-131.
2. Tekin, G., 2020. Düşük Fenilalanin İçerikli Glutensiz Bisküvi Üretiminde Bazı Hidrokolloidlerin Etkilerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 162.
3. Türksoy, S., Özkaya, B., 2006. Gluten ve Çölyak Hastalığı. Türkiye 9. Gıda Kongresi. 24-26 Mayıs 2006, Bolu, 807-810.
4. Arendt, E.K., O'Brien, C.M., Schober, T., Gormley, T.R., Gallagher, E., 2002. Development of Gluten-Free Cereal Products. *Farm and Food*, 12, 21-27.
5. Hayıt, F., Gül, H., 2015. Karabuğday'ın Sağlık Açısından Önemi ve Unlu Mamüllerde Kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(1), 123-132.
6. Gao, Y., Janes, M.E., Chaiya, B., Brennan, M.A., Brennan, C.S., Prinyawiwatkul, W., 2018. Gluten-Free Bakery and Pasta Products: Prevalence and Quality Improvement. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(1), 19-32.
7. Yıldız, Ö., 2010. Farklı Formülasyon, Pişirme ve Depolama Sürelerinin Glütensiz Kek Kalitesi Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 229.
8. Anonim., 2012. Türk Gıda Kodeksi Gluten İntoleransı Olan Bireylere Uygun Gıdalar Tebliği, Tebliğ No: 2012/4, T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Ankara.
9. Anonim., 2017. Türk Standartları Enstitüsü, Bisküvi Standardı, TS 2383.
10. Guangchang, P., Xie, J., Chena, Q., Hu, Z., 2012. How Functional Foods Play Critical Roles in Human Health. *Food Science and Human Wellness*, 1, 26-60.
11. Istva'n, S., Ka'polna, E., Ka'polna, B., Lugasi, A., 2008. Functional Food Product Development, Marketing and Consumer Acceptance-A review. *Appetite*, 51, 456-467.
12. Güneş, R., Palabıyık, İ., Kurultay, Ş., 2018. Şekerleme Teknolojisinde Fonksiyonel Ürün Üretimi. *Gıda*, 43(6), 984-1001.
13. Artuş, B.Ş., 2020. Hakkâri Bölgesinde Yetişen "*Gundelia rosea*, *Gundelia colemerikensis*, *Diplotaenia turcica*, *Ferula pseudalliacea*, *Allium rhetoreanum*, *Allium shatakiense* ve *Thymus kotschyanus boiss&hohen. var. kotschyanus*" Bitkilerinin Bakır, Çinko, Demir, Kadmiyum, Kurşun, Mangan, Kobalt, Arsinik Ağır Metal Değerlerinin Saptanması. Yüksek Lisans Tezi, Hakkari Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, Hakkari, 85.
14. Dastan, D., Salehi, P., Reza, G.A., Zimmermann, S., Kaiser, M., Hamburger, M., 2012. Disesquiterpene and Sesquiterpene Coumarins from *Ferula pseudalliacea*, and Determination of Their Absolute Configurations. *Phytochemistry*, 78, 170-178.
15. Dastan, D., Hamah-Ameen, B.A., Salehi, P., Ghaderi, H., Miran, M., 2022. Chemical Composition and Bioactivities of Essential Oils from Different Plant Parts of *Ferula pseudalliacea* Rech. f. as an Endemic Plant from Iran. *Natural Product Research*, 36(5), 1311-1316.
16. Aydın, N., 2012. Keçiboynuzu Unu İlavesinin Bisküvinin Bazı Kalite Kriterlerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 52.
17. AACC., 2010. International Approved Methods of Analysis. American Association of Cereal Chemists, 11th Edition, St. Paul, MN., USA.
18. Özkoç, S.Ö., Seyhun, N., 2015. Kızılötesi-Mikrodalga Kombinasyonlu Fırında Pişirilmiş Donmuş Hamurdan Yapılan Glutensiz Ekmeklerin Kalitesi Üzerine Sakız Türü ve Ketan Tohumu Konsantrasyonunun Etkisi. *Gıda ve Biyoproses Teknolojisi*, 8(12), 2500-2506.
19. Demirel, H., 2017. Farklı Turunçgillerden Elde Edilen Albedoların Bisküvi Üretiminde Kullanım İmkanları. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 76.
20. Chinma, C.E., Ibrahim, P.A., Adedeji, O.E., Ezeocha, V.C., Oluoba, E.U., Kolo, S.I., Adebo, O.A., 2022. Physicochemical

- Properties, In Vitro Digestibility, Antioxidant Activity and Consumer Acceptability of Biscuits Prepared from Germinated Finger Millet and Bambara Groundnut Flour Blends. *Heliyon*, 8(10), e10849.
21. Oliveira, K.E., Takase, I., Andrade Gonçalves, É.C.B., 2009. Development of Gluten-Free Cookie from Medicinal Plants (*Guaraná-Paullinea cupana* and *Catuaba-Anemopaegma mirandum*) Aiming at Copper, Iron, and Zinc Supplementation. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29(3), 631-635.
  22. Kunt, V.H., 2018. Glutensiz Bisküvi Formülasyonlarının Zenginleştirilmesi ve Bisküvi Kalitenin Artırılması. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 88.
  23. Doğan, H., 2016. Glutenli ve Glutensiz Bisküvi Üretiminde Fonksiyonel Bir Bileşen Olarak Uşkun Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Van, 162.
  24. Yıldız, E., 2019. Glutensiz Bisküvi Üretiminde Badem Unu ve Stevya Kullanımı. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 89.
  25. Singh, G.D., Riar, C.S., Saini, C., Bawa, A.S., Sogi, D.S., Saxena, D.C., 2011. Indian Water Chestnut Flour-Method Optimization for Preparation, Its Physicochemical, Orphological, Pasting Properties and Its Potential in Cookies Preparation. *LWT- Food Science and Technology*, 44, 665-672.
  26. Olawoye, B., Gbadamosi, S.O., Otemuyiwa, I.O., Akanbi, C.T., 2020. Gluten-Free Cookies with Low Glycemic Index and Glycemic Load: Optimization of the Process Variables via Response Surface Methodology and Artificial Neural Network. *Heliyon*, 6(10), e05117.
  27. Olojede, A.O., Oahimire, I.O., Gbande, J.I., Osondu-Igbokwe, A.D., Thomas, R.M., Olojede, D.S., Banwo, K., 2022. Evaluation of Acha Flour in the Production of Gluten-Free Sourdough Cookies. *International Journal of Food Science & Technology*.
  28. Maria, E.M., Sanz, T., Rosell, C.M., 2014. Establishing the Function of Proteins on the Rheological and Quality Properties of Rice Based Gluten Free Muffins. *Food Hydrocolloids*, 35, 150-158.
  29. Silva, T.F., Conti-Silva, A.C., 2016. Preference Mappings for Gluten-Free Chocolate Cookies Sensory and Physical Characteristics. *Nutrition & Food Science*, 46(3), 374-387.
  30. Oliveira Pineli, L.D.L., Carvalho, M.V., Aguiar, L.A., Oliveira, G.T., Celestin, S.M.C., Botelho, R.B.A., Chiarello, M.D., 2015. Use of Baru (Brazilian Almond) Waste from Physical Extraction of Oil to Produce Flour and Cookies. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 50-55.
  31. Laguna, L., Varela, P., Salvador, A.N.A., Sanz, T., Fiszman, S.M., 2012. Balancing Texture and Other Sensory Features in Reduced Fat Short-Dough Biscuits. *Journal of Texture Studies*, 43(3), 235-245.
  32. Ağan, C., Doğan, M., 2022. Lezzet ve Lezzetin Bilimi: Mutfak Şeflerinin Lezzet Algıları Üzerine Bir Araştırma. *Safran Kültür ve Turizm Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 199-219
  33. Gölemezli, M., 2022. Duyusal Pazarlamada Görsel Unsurların Tüketicilerin Organik Ürün Algısı ve Tercihindeki Rolü: Zeytinyağı Ambalajı Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Genel İşletme Programı, Denizli, 177.
  34. Farzana, T., Hossain, F.B., Abedin, M.J., Afrin, S., Rahman, S.S., 2022. Nutritional and Sensory Attributes of Biscuits Enriched with Buckwheat. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100394.
  35. Gülhan, M.E., Karaça, A.C., 2023. Effects of Lentil Flour on the Quality of Gluten-Free Muffins. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(74), 287-302.
  36. Han, H., Baik, B., 2008. Antioxidant Activity and Phenolic Content of Lentils (*Lens culinaris*), Chickpeas (*Cicer arietinum l.*), Peas (*Pisum sativum l.*) and Soybeans (*Glycine max*), and Their Quantitative Changes During Processing. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1971-1978.
  37. Pavlovic, I., Petrovic, S., Radenkovic, M., Milenkovic, M., Couladis, M., Brankovic, S.,

- PavlovicDrobac, M., Niketic, M., 2012. Composition, Antimicrobial, Antiradical and Spasmolytic Activity of *Ferula heuffelii* griseb. ex *heuffel* (Apiaceae) Essential Oil. Food Chemistry, 130(2), 310-315.
38. Uce, G., Tunçtürk, M., 2014. Hakkâri’de Doğal Olarak Yetişen ve Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Yabani Bitkiler. Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi, 7(2), 21-25.

## R290 Refrigerant Performance in a Commercial Refrigerator

Turhan SARAÇ<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-7827-7980

Mahmut ÜNALDI\*<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-2144-8085

<sup>1</sup>Selçuk University Institute of Sciences, Mechanical Engineering Department, Konya, Türkiye

<sup>2</sup>Selçuk University, Cihanbeyli Vocational School, Motor Vehicles and Transportation  
Technology Department, Konya, Türkiye

Geliş tarihi: 04.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: SARAÇ, T., ÜNALDI, M., (2024). R290 Refrigerant Performance in a Commercial Refrigerator. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 157-166.

### Abstract

In this study, we investigated the impact of the environmentally friendly R290 refrigerant, which has a higher Coefficient of Performance (COP), on the operating performance of the cooling system, as an alternative to the commonly used R404A refrigerant, which has a negative effect on global warming. The boundary conditions in the refrigeration cycle were designed to be -10°C evaporation and +45°C condensation, and the performance of the system referenced in the TS EN ISO 23953-2 standard was experimentally compared for both refrigerants. The temperature and energy consumption values of the M-packs, whose location and quantity are specified in the relevant standard, have been evaluated in terms of the cooling performance of the cabinet. As a result of the study, the heat removal performance of the system using R290 fluid in the condenser showed better results compared to R404A. According to the relevant standard, the system using R290 is in the C and D classes in the energy consumption evaluation.

**Keywords:** Global warming, R290, R404A, Cooler liquid, Cooling performance

### Ticari Buzdolabında R290 Soğutucu Akışkan Performansı

#### Öz

Bu çalışmada, küresel ısınma üzerinde olumsuz etkisi olan ve yaygın olarak kullanılan R404A soğutucu akışkanına alternatif olarak, daha yüksek Performans Katsayısına (COP) sahip çevre dostu R290 soğutucu akışkanının soğutma sisteminin çalışma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Soğutma çevrimindeki sınır şartları -10°C buharlaştırma ve +45°C yoğunlaştırma olacak şekilde tasarlanarak TS EN ISO 23953-2 standardı referans alınan sistemin performansı her iki soğutucu akışkan için deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İlgili standartta konumu ve miktarı belirtilen M-paketlerinin sıcaklık ve enerji tüketim değerleri dolabın soğutma performansı yönünden değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda R290 akışkan kullanılan sistemin R404A'ya göre kondenserde ısı atma performansı daha iyi sonuçlar sergilemiştir. İlgili standarda göre R290 kullanılan sistem enerji tüketimi değerlendirmesinde C ve D sınıfında yer almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel ısınma, R290, R404A, Soğutucu akışkan, Soğutma performansı

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Mahmut ÜNALDI, munaldi@selcuk.edu.tr

## 1. INTRODUCTION

The studies that started with the Montreal Protocol in 1987 to protect the ozone layer from the negative effects of refrigerants, reduce the greenhouse effect, and regulate the production and usage conditions continued with the 1990 London and 1992 Copenhagen meetings. These issues have been the subject of international agreements with the 1997 Kyoto Protocol and the United Nations Framework Convention on Climate Change in 2015. As a result of these protocols and agreements, it has been adopted to use refrigerants with 0 or lower Ozone Depletion Potential (ODP) and Global Warming Potential (GWP) values.

Cooling, which we often use in our daily life and in industrial areas, can be performed physically, chemically or mechanically in three different methods. Mechanical refrigeration systems operating according to the principle of reverse Carnot cycle are used for food, cold storage, supermarket refrigeration, ice rinks, etc. it is used in many areas such as. Perishable food products are stored and displayed for a certain period of time in display cabinets. In these cooling systems, 60-70% of the energy is spent in the compressor and condenser. For this reason, it is necessary to reduce the energy consumption costs of cooling systems, improve the parts that consume too much energy and reduce their negative effects on the environment [1].

The studies for cooling and heating systems, which started with the Montreal Protocol in 1987, have been the subject of international agreements with the Kyoto Protocol of 1997 and the United Nations Framework Convention on Climate Change of 2015. These regulations are aimed at reducing the use and production of refrigerants with high GWP and ODP. The refrigerant most often used in supermarket cabinets is R404A. The ODP value of R404A refrigerant is zero, but the GWP ratio is high [2].

Scientists are giving priority to refrigerants with low GWP values and systems that will reduce the

amount of charging in order to reduce the impact of refrigerants on global warming [3].

Trying to protect nature with laws and laws can only be within the scope of priorities and possibilities. Although there are quite a large number of refrigerants that can be used in market-type refrigerants, their effects on nature in terms of ODP and GWP ratio, usage quantities, suitability to the existing system and costs constitute their limitations in terms of usage. Today, the low cost of industrial cooling cabinets, the easy availability of cooling equipment and the fact that it is an environmentally friendly refrigerant make R290 gas an advantageous position for manufacturers to choose.

According to Devotta et. al., in their study, they compared the refrigerants R410A, R134a, R407C, R290, R32, R135 and R134a, which can be an alternative to R22 refrigerant for air conditioners, with experimental data. In the comparison made according to the COP value, it was concluded that the refrigerant R134a is close to the R22 gas, but large compressor selections should be made to ensure the capacity. R290 refrigerant has similar properties to R22, but in the study, where it was stated that the compressor variety is low, it was stated that R407C is the most suitable and useful refrigerant instead of R22 gas [4].

In their study, Spatz and Motta examined the efficiencies of R290 and R410A refrigerants by comparing them with R22 refrigerant. It has been experimentally shown that R290 refrigerant gives 5% better results than R22 [5].

In a study conducted by Kaya [6], the efficiency of the system in the steam compression refrigeration cycle was examined by using R404A refrigerant with zero ODP value instead of R22 refrigerant. As a result of this research, an increase in cooling capacity by 2.32% was achieved by using R404A refrigerant instead of R22 gas. In addition, the COP values of R22 and R404A refrigerants were found to be 2.12 and 1.91, respectively.

Bortolini et. al., in their study, they examined the availability and performance of R410A and R407F refrigerants that can be used instead of R404A

refrigerant used in industrial refrigeration systems. In the cooling system at medium temperature values (10°C, -5°C), it has been calculated that the cooling capacity and COP values of R410A and R407F refrigerants are high compared to R404A gas. The cooling capacity and COP values calculated in the study were calculated as 1297 W and 1.47 for refrigerant R404A, 1417 W and 1.51 for R407F, 1342 W and 1.75 for R410A, respectively [7].

Llopis et. al. analysed five different refrigerants (R717, R744, R290, R1234ze and R152a) that can be used as a substitute for R404A and R134a refrigerants, and compared the energy analysis and environmental effects of refrigerants that can replace R404A and R134a gases with high GWP values. R717, R744, R290, R1234ze and R152a refrigerants were tested in the same system instead of R404A and R134a, which are often used in refrigeration systems. The best performance in the test results was given by a two-stage system using R404A refrigerant. However, due to the high GWP value, it has been stated that the choice of cascade cycle using R744 refrigerant, which has a low GWP value and is environmentally friendly, will be more appropriate [8].

In the study conducted by Kızılkın [9], the performances of seven refrigerants were compared for cold storage application. As a result of the study, the COP values of refrigerants R170, R744, R1270, R290, R600a, R717 and R600, respectively 1.463, 1.482, 2.366, 2.369, 2.448, 2.462 and it was found to be 2.5.

According to Makhnatch et. al. examined the use of R449A refrigerant instead of R404A in their study related to cooling systems. Due to its favourable thermodynamic properties and the maximum acceptable discharge temperature, it has been stated that R449A can be used in the cooling system designed for R404A with a slight expansion adjustment and a 4% coolant charge increase. Although the COP value of the R449A has a cooling capacity that is about 13% lower, it is almost the same as the COP value of the R404A. When it is desired to use R449A instead of R404A, it has been stated that it will be sufficient to adjust only the

amount of refrigerant and the thermostatic expansion valve in the cooling system designed for R404A [10].

Sapali and Choudhari, analysed the use of R290 instead of refrigerant R22 in their study. As a result of the analyses carried out using the vapor compression cooling cycle, the performance of the R290 was lower than that of the R22. Due to the low GWP and ODP values, it was stated that it would be appropriate to use it as an alternative to R22 [11].

Yıldırım et. al. in their study, they analysed the energy analysis and environmental effects of R404A and its alternative R454C refrigerants in the refrigeration system. The analyses were performed for five different evaporator and condenser temperatures. As a result of the study, it was found that the COP value of R454 is about 4% higher than R404A [12].

Biçen, examined the use of R290 refrigerant instead of R404A in commercial type freezers. As a result of the examination, it has been concluded that R290 refrigerant does a better job for the condenser of the same size compared to R404A [13].

When the studies were examined, it was observed that the environmental effects of the refrigerants used in cooling systems, energy analyses and cooling performances were measured. Although the refrigerant used in supermarket cabinets in general is R404A, its use in refrigeration systems is prohibited according to the F gas regulation because its effect on global warming is too great.

In this study, which will support these studies and enrich the literature with a different perspective, the effects of R404A and R290 refrigerants on the availability and cooling performance in supermarket product display cabinets were experimentally investigated. In the experimental study, in order to compare the performance of refrigerants, no design changes were made to the cooling system, only compressor changes suitable for the fluids were made and cooling performance, energy consumption values and energy efficiency were compared.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Refrigeration systems used in the field of industrial air conditioning are a closed circuit consisting of compressor, condenser, expansion valve, capillary tube and evaporator elements connected to each other in series [14]. The properties that refrigerants, which are the intermediate that provide heat transfer in the vapor compression refrigeration cycle, are required to have and expected from repair are too many. Decontamination. On this issue, Koyun et al. (2005); Calm, (2008); Abas et al., (2018); Demirci et al. (2020) and Araz et al. (2013) have provided detailed information in their studies [14-18].

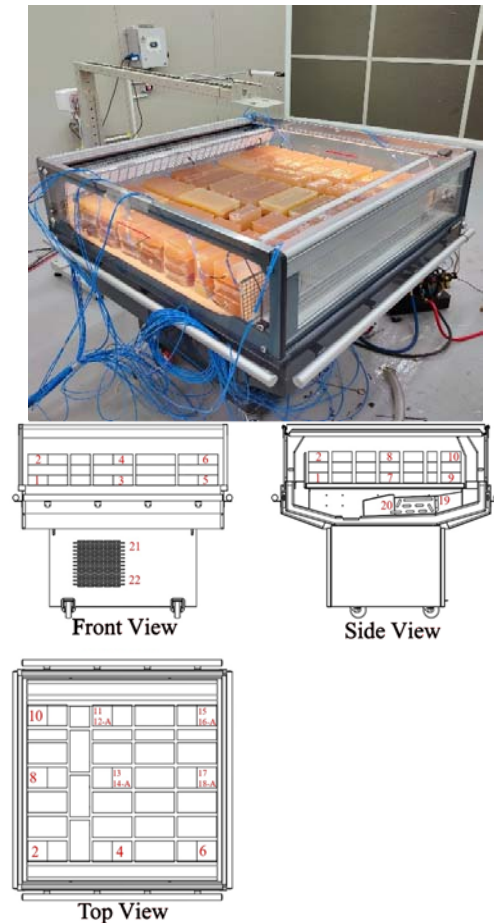
The imitation elements used to simulate the operating conditions of the cabinet and to measure the cooling performance are called M-packages. In order to measure the temperatures of the M-packages placed in the cabinet, temperature sensors are installed in such a way that they directly contact the packages in accordance with the standard. A M-pack is an odorless solid rubber container with a density of 1 g/ml and is composed of 23% oxyethylmethylcellulose, 72-76% (vol.) water and the rest sodium chloride and 6-chloro-m-cresol. In the experiments conducted in accordance with TS EN ISO 23953-2 “Refrigerated Display Cabinets” standard, the way the M-packages are loaded into the cabinet and the temperature measurement points of the packages, the thermocouple placements, the interpretation of the performance criteria were made according to the conditions and rules specified in this standard [19].

The list of M-packs used in filling the cabinet are;

- 18 pieces 50x100x100 cm Thermocouple installed package
- 21 pieces 50x100x100 cm Standard package (500 g)
- 60 pieces 50x100x200 cm Standard package (1000 g)
- 12 pieces 50x50x200 Standard package (500 g)

The temperatures of the M-packages used for the cooling performance test in the cabinet, evaporator inlet-outlet temperatures and condenser suction-blowing temperature measurements were made

with a T-type thermocouple. T-type thermocouple has ranges 150 to 400 °C, sensitivity 0.02 °C and limits of error  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . 18 Thermocouples for test packages, 2 thermocouples for evaporator and 2 thermocouples for condenser are placed in the cabinet. The placement of the M test packages, and the temperature sensor numbers are shown in Fig-1. The test chamber is heat-insulated, the internal environment is set to be at a temperature of  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$  and relative humidity of  $60 \pm 3\%$ , and the air flow in the test chamber is December 0.1-0.2 m/s from the front face of the cabinet. The test chamber where the experiment was conducted covers Class-3 according to the standard.



**Figure 1.** Placements of M test packages in the cabinet and thermocouple placements



The cabinet in the test assembly was tested under  $-10^{\circ}\text{C}$  evaporation and  $+45^{\circ}\text{C}$  condensation hot conditions. In the commercial display product cabinet, R404A refrigerant is usually used in low and medium temperature refrigeration applications, while R290 refrigerant is suitable for use in low temperature refrigeration applications, so it has been mandatory to use hermetic type compressors with different properties in the refrigeration system. In addition, in accordance with the relevant standard, R404A gas 630 g was used in the system, while R290 gas was charged to the tank in an amount of 90 g due to its A3 safety rating, flammable and explosive properties. The compressor characteristics according to the refrigerant used in the system are given in Table 1.

When the energy classification of the display cabinet is made, the type of cabinet, the volume and the temperatures of the M-packages are evaluated as criteria in addition to the energy consumed by the cabinet on a daily or annual basis. Within the scope of the study, these criteria and the display area of the cabinet are in accordance with TS EN ISO 23953-2 standard and were calculated in detail in the study by Saraç [20]. As a result of the calculations, the energy classes of R290 and R404A refrigerant systems were found to be C and D, respectively.

**Table 1.** Compressor specifications

	R290	R404A
Cooling Capacity (W)	396	465
Input Power (W)	162	276
COP Value	2.44	1.69
Evaporation Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-10	
Condensation Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	45	

The performance tests of the refrigerants in the cabinet were carried out according to TS EN ISO 23953-2 standard. The types of M packages, their number and the positions of the packages and T-type thermocouple sensors have been adjusted as specified in the standard. The temperature values of the compressor's pressure-suction line, evaporator inlet-outlet pipes and the suction-blowing zone of the condenser fan were measured with the T-type thermocouple sensor. The evaluation was made according to the lowest – highest temperature M-

packages. Since no design changes were made in the cabinet except for the mandatory compressor change, the lowest and highest temperature values of both fluids were obtained from the same numbered sensors.

Experimental data were obtained after the cabinet was operated for 24 hours before the experiments to ensure that the core temperatures of the M-packages placed in the cabinet reached equilibrium and to capture the necessary temperature values before starting the test. Data were taken from 22 temperature sensors placed in M packages every 60 seconds and their graphs were plotted. With the help of the analyser, the electrical forces attracted by the cabinet for both fluids were measured, and the energy class of the cabinet was determined.

Datascan 7020 was used to record the experimental data on the computer. Main features are direct sensor connection for DC voltages, Thermocouples, strain gauges, RTD's, resistance, and I6 bit measurement performance with  $0.625\mu\text{V}$  sensitivity, and Accuracy  $\pm 0.02\%$  rdg  $+0.01\%$  range+1bit. Entes brand MRP-26S-21 model analyser was used to evaluate the commercial cabinet used in the study according to its energy consumption value (Table 2).

**Table 2.** Entes analyser specifications

Measurement Range	10-300 VAC, 10-480 VAC
Communication Interface / Protocol	RS 485 / Modbus RTU
Operating Voltage	95-270 VAC/DC
Operating Frequency	50/60 Hz
Power Consumption	< 6 VA
Transfer Speed	2400 - 115200 bps
Nominal Current	In: 5A / 1A
Lowest Current	5 mA
Measurement Range	50 mA – 5.5 A
Accuracy	$\pm 0.5\%$
Protection Class Terminal	IP20, IP40

Uncertainty analysis is needed to easily identify the variable that causes the most errors, to prove random errors or the accuracy of experiments. Even if the instruments used in the experiments are metrologically approved, the measurements contain different levels of errors. Uncertainty analysis gives

us a methodological approach to the sensitivity of the results. The measurement errors caused by the test device is defined as the difference between the measured value and the real value and they are divided into two groups: random and systematic error. Random error is the difference between a single measured value and the average value of many individual measurements. The difference between the mean value of individual measurements and the true value is defined as systematic error. Errors that may occur in temperature measurement vary depending on the measuring instruments used in the experiments [21, 22].

The uncertainty ( $W_R$ ) of the measured magnitude (R) in the system with respect to each independent variable ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ) can be calculated from the following Equation-1 [23, 24].

$$W_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (1)$$

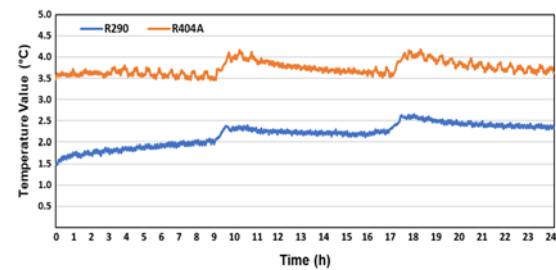
**Table 3.** Average uncertainties of some measured and calculated parameters

Parameter	Uncertainty (%)
Connection elements	0.1
Time measurement	0.1
Length and diameter	0.1
Temperature measurement	5.1
Energy consumption	7.1
Energy class determination	7.3

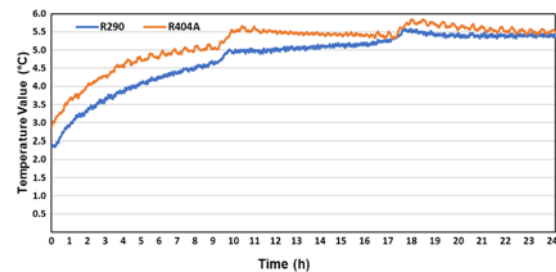
### 3. RESULTS

The temperature changes of the M-packages, temperature changes of the M-packages at the lowest and highest temperature, evaporator inlet-outlet temperatures, condenser suction-blowing temperatures and energy consumption data were examined in accordance with the TS EN ISO 23953-2 standard without any other changes in the cooling system except the compressor, which was changed compulsorily due to the properties of the fluid used, the humidity and temperature of the test chamber were kept under constant control in this study. The experiments were carried out over a 24-

hour period, during which the average temperature value of the test chamber was measured as 57.2 °C and the humidity value was measured as 23.5%, and these values comply with the Climate Class-3 requirements of the TS EN ISO 23953-2 standard. As a result of the 24-hour operation of the test cabinet, the average temperatures of the M-packages installed with the sensor are shown in the graph in Figure 2. The average temperature values for both refrigerants in the cabinet were calculated as 2.16 °C for R290 and 3.73 °C for R404A. As a result of the visualized and calculated data, it has been obtained that the cooling environment is 73% cooler in the system operated with R290 refrigerant.



**Figure 2.** Average temperature graph of M packages

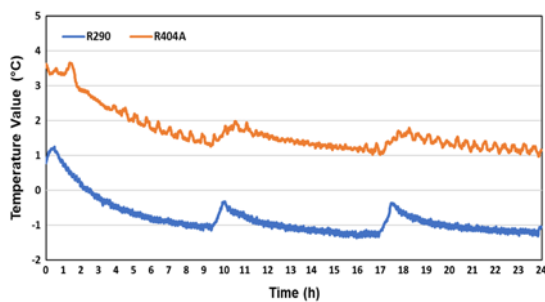


**Figure 3.** Temperature change graph of No.8 M-packages for R404A and R290

In Figure 3, the temperature change of the M-package to which the sensor No. 8, which has the highest temperature value during the cooling process with refrigerants R404A and R290, is connected, is graphically given. In the performance evaluation performed according to the cooling of M-packages, the highest temperature values for R404A and R290 gases were taken from the M-package in which the sensor No. 8 was installed, and these values were measured as 5.69 °C and 5.85

°C respectively. The reason why M-package No. 8 is the highest temperature product in both fluids is that the design of the cabinet has not been changed. When the two refrigerants are compared for the hottest products, there does not seem to be a significant temperature difference. But 8 hours after the start of the experiment, M-package No. 8 reached a temperature of 5 °C with R404A gas and then remained stable at a temperature of 5.5°C for 7 hours. Reaching a temperature of 5°C with R290 gas took about 10 hours, and then reached a temperature of 5.5°C only in 8 hours. the highest temperature value reached in R404A gas for M-package No. 8 was measured as 5.85°C, while R290 was measured as 5.69°C.

When the cooling performance of M-packages on the side of different refrigerants is examined, the M-packages to which sensor number 13 is connected are the ones with the lowest temperature. according to the data obtained from sensor No. 13, the temperature values for refrigerants R404A and R290 were obtained as 0.97°C and -1.36°C. Due to the fact that the difference between the lowest temperature values of the two refrigerants is 2.33°C and the cooling curve graphs are smoother, as shown in Figure 4, the cooling performance of the R290 has been interpreted as better. In the first stage of the cooling experiment in both fluids, thanks to the compressor, it provided a temperature drop of about 2°C, while in other studies it provided a temperature drop of 1°C each.

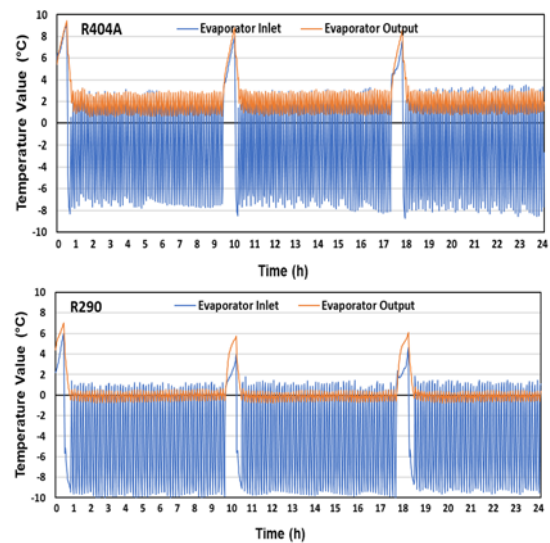


**Figure 4.** Temperature change graph of No.13 M-packages for R404A and R290

The graph in Figure 4 shows that the temperature of the M-package increases after the compressors stop

automatically. With the R290, the temperature increase is linearly fast, and then the compressor is activated, significantly reducing the temperature of the product. When the compressor stops in the R404A fluid, the temperature increase draws a parabolic curve, while the temperature decrease was not much when the compressor was activated.

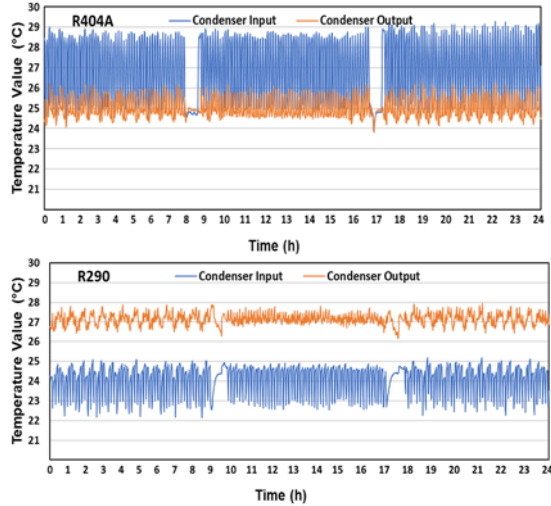
The graphs drawn according to the data obtained from the thermocouple sensors in the evaporator inlet and outlet pipes of the refrigeration system using R404A and R290 refrigerant are shown in Figure 5. It is ideal that the difference between the evaporator inlet and outlet temperature is 10°C, and it is desirable that the refrigerant should be at a temperature close to -10°C at the evaporator inlet and 0°C at the outlet. Dec. While these desired conditions could be achieved with R290 gas, they could not be achieved with R404A gas.



**Figure 5.** Graphs of evaporator inlet and outlet temperatures for R404A and R290

The evaporator inlet temperature values were measured as -8.73 and -10.38°C for R404A and R290, respectively. According to these values, R290 refrigerant is 18% more efficient than R404A. In order to obtain the desired operating values with R404A gas, it is necessary to make changes in the design and cooling elements of the cooling system.

During the experiments, the ambient temperature at which the cooling system was operating was approximately 25°C, while the fan blowing temperature value was measured as 29.8°C.



**Figure 6.** Condenser suction and blowing temperature graphs for R404A and R290

The result of the measurements made by placing thermocouple sensors in the suction and blowing areas of the condenser is shown in Figure 6. With this graph, it is possible to decide whether the condenser is sufficient for the system. In the system using R290 refrigerant, the air absorbed from the environment at a temperature of 25°C is expelled from the condenser as a maximum of 28°C ( $\Delta T= 3^{\circ}\text{C}$ ), similarly, in the system using R404A refrigerant,  $\Delta T= 4.8^{\circ}\text{C}$  was measured. No heat was observed in the condenser in both refrigerants.

According to these graphs, it can be concluded that the condenser is suitable for use in two refrigerants, and the cost can be reduced by reducing the condenser capacity by 21% and 57% for R404A and R290, respectively, with the area covered by the cooling system.

It was measured that the system operates at a maximum power of 150 W with R290 gas and 250 W with R404A, since it is mandatory to use different compressors in the system due to the different properties of refrigerants. The EMC 3121U model compressor used in the R290 fluid

system for 24-hour power consumption measurements of R290 and R404A refrigerant systems under 220 V - 50 Hz operating conditions works in 4-minutes periods. Together with the defrosting times, the compressor worked for 12 hours and 13 minutes in a 24-hour period. In the R404A fluid system, the working period of the EMT 6165GK compressor was 3.5 minutes and the total working time was 11 hours and 32 minutes. The 24-hour power consumption values of the systems using R290 and R404A refrigerants were measured as 95 and 155 Watts, respectively. The system using R290 refrigerant has realized 63% less energy consumption in energy consumption.

#### 4. CONCLUSION

In order to compare the cooling performances of the systems using R404A and R290 as refrigerants, the temperatures of the M-packages, the compressor pressure-suction line, the evaporator inlet-outlet pipes and the suction-blowing region of the condenser fan were measured in accordance with the TS EN ISO 23953-2 standard in this study and the energy consumption was compared. With the study conducted, the following results were found: The R290 refrigerant system performs close to the M1 class specified in the standard, while the R404A refrigerant system is in the M2 Class.

There is a temperature difference of  $1.57^{\circ}\text{C}$  between the average product temperatures between the system used R290, and R404A. For this reason, the cooling efficiency of the R290 system in the cabinet is higher.

It has been determined that the region where sensor number 8 is located is less cooled than other regions. The reason for this is interpreted as the air circulation of the cabinet does not show a homogeneous distribution, and better cooling can be achieved in this region with a design change.

The condenser capacity of R404A refrigerant system is 33% larger than R290. For this reason, the same cooling efficiency can be achieved with a condenser with a capacity as small as 30% in the systems used R290.

When the heat dissipation performances of the same condenser are examined, the R290 refrigerant cycle performs 57% better.

The reason why the energy consumption of the R404A refrigerant system is higher is that the cooling capacity of the compressor of this system is 17% larger than that of the R290.

Since the condenser efficiency of the R290 refrigerant system is better, a decrease in the electrical energy used by reducing the rotation speed of the fan motor can be achieved by using a fan speed controller in the system. It will reduce the efficiency of the condenser by reducing the condenser fan speed. But this situation can provide customer satisfaction by making the cabinet work more noiselessly.

When the evaporation temperatures for both refrigerants are examined, they are  $-10.38^{\circ}\text{C}$  and  $-8.73^{\circ}\text{C}$  for R290 and R404, respectively. In other words, the cooling capacity provided by the R404A with less gas charge can be provided with the R290 refrigerant.

Since there will be less gas charge in systems with R290 refrigerant, smaller diameter pipes and smaller condensers can be used. With the reduction of the condenser, an increase in the internal area of the cabinet can be achieved.

Due to the different properties of the fluids used, the system with R290 is 63% more efficient in terms of energy consumption since different compressors are used in addition to the amount of fluid usage.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Çağlayan Refrigeration Ind. Trade. Co. Ltd. which allowing performance tests.

## 6. REFERENCES

1. Tuzcu, H., Güngör, A., 2013. In Turkish: Süpermarket Soğutma Sistemleri ve Enerji Kongresi Verimliliğinin Artırılması Amaçlı İzmir'de Bir Süpermarket Soğutma Sisteminin İncelenmesi, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Soğutma Teknolojileri Sempozyumu, İzmir, 523-543.
2. Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sanchez, D., Nebot-Andres, L., Catalan-Gil, J., Cabello, R., 2019. R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as Low-GWP Replacements of R-404A: Experimental Evaluation and Optimization. International Journal of Refrigeration, 106, 133-143.
3. Poggi, F., Macchi-Tejeda, H., Leducq, D., Bontemps, A., 2008. Refrigerant Charge in Refrigerating Systems and Strategies of Charge Reduction. International Journal of Refrigeration, 31(3), 353-370.
4. Devotta, S., Waghmare, A., Sawant, N., Domkundwar, B., 2001. Alternatives to HCFC-22 for Air Conditioners. Applied Thermal Engineering, 21(6), 703-715.
5. Spatz, M. Motta, S., 2004. An Evaluation of Options for Replacing HCFC-22 in Medium Temperature Refrigeration Systems. International Journal of Refrigeration, 27(5), 475-483.
6. Kaya, S., 2009. Performance Comparison on The Vapour Compression Refrigeration System When Retrofitting from R22 to R404A. Master Thesis, Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, İstanbul, 74.
7. Bortolini, M., Gamberi, M., Gamberini, R., Graziani, A., Lolli, F., Regattieri, A., 2015. Retrofitting of R404a Commercial Refrigeration Systems Using R410a and R407f Refrigerants. International Journal of Refrigeration, 55, 142-152.
8. Llopis, R., Sanchez, D., Sanz-Kock, C., Cabello, R., Torrella, E., 2015. Energy and Environmental Comparison of Two-Stage Solutions for Commercial Refrigeration at Low Temperature: Fluids and Systems. Applied Energy, 138, 133-142.
9. Kızıllan, Ö., 2015. A Comparative Investigation of Natural Refrigerants: A Case Study for Cold Storage Application. SDU International Journal of Technological Science, 7(3), 184-199.

10. Makhnatch, P., Babiloni, A., Rogstam, J., Khodabandeh, R., 2017. Retrofit of Lower GWP Alternative R449A Into an Existing R404A Indirect Supermarket Refrigeration System. *International Journal of Refrigeration*, 184-192.
11. Sapali, S., Choudhari, C., 2017. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. *Energy Procedia*, 109, 346-352.
12. Yıldırım, R., Kumaş, K., Akyüz, A., 2021. In Turkish: Soğutma Sisteminde R404A Yerine R454C Soğutucu Akışkanın Kullanılmasının İncelenmesi: Enerji ve Çevresel Analizi. *Teknik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 47-51.
13. Biçen, E., 2021. In Turkish: Raftan Soğutmalı Ticari Tip Dondurucularda R404a Soğutucu Akışkanın Yerine Soğutucu Akışkan R290 Kullanımının Soğutma Performansı Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 75.
14. Demirci, E., Özkaymak, M., Koşan, M., Akkoç, A., Aktaş, M., 2020. In Turkish: Doğal Soğutucu Akışkan Kullanımında Gelişmeler. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 184-199.
15. Koyun, T., Koyun, A., Acar, M., 2005. In Turkish: Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar ve Bu Akışkanların Ozon Tabakası Üzerine Etkileri. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 88, 46-53.
16. Calm, J.M., 2008. The Next Generation of Refrigerants-Historical Review, Considerations and Outlook. *International Journal of Refrigeration*, 31(7), 1123-1133.
17. Abas, N., Kalair, A.R., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z., Saleem, M.S., 2018. Natural and Synthetic Refrigerants, Global Warming: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 557-569.
18. Araz, M., Güngör, A., Hepbaşlı, A., 2013. In Turkish: Düşük Küresel Isınma Potansiyeline Sahip Soğutucu Akışkanların Soğutma Uygulamalarındaki Kullanımının Değerlendirilmesi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi - 17/20 Nisan, İzmir, 575-604.
19. TS EN ISO 23953-2, 2024. Refrigerated Display Cabinets-Part 2: Classification. Requirements and Test Conditions, Ankara, Türkiye, 124.
20. Saraç, T., 2023. In Turkish: Promosyon Ticari Tip Dolaplarda R404A Soğutucu Akışkan Yerine R290 Kullanılmasının Soğutma Performansına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 72.
21. Shan, K., Wang, S., Xiao, F., Sun, Y., 2013. Sensitivity and Uncertainty Analysis of Cooling Water Control Strategies. *HVAC&R Research*, 19(4), 435-443.
22. Genceli, O.F., 1998. In Turkish: Ölçme Tekniği: (Boyut, Basınç, Akış ve Sıcaklık Ölçmeleri). Birsen Yayınevi, 387.
23. Holman, J.P., 2021. *Experimental Methods for Engineers*, Eighth Edition, 64, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGrawHill Book Company, 769.
24. Akpınar, E.K., 2005. In Turkish: Deneysel Çalışmalarda Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi. *Mühendis ve Makina*, 46(540), 41-48.

## Load Balance Forecasting Based on Hybrid Deep Neural Network

Hajir KHALAF<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-2887-225X

Nezihe YILDIRAN<sup>\*2</sup> ORCID 0000-0002-5902-1397

<sup>1</sup>Bahçeşehir University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Electric-Electronic Engineering Department, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Bahçeşehir University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Energy Systems Engineering Department, İstanbul, Türkiye

Geliş tarihi: 12.08.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: KHALAF, H., YILDIRAN, N., (2024). Load Balance Forecasting Based on Hybrid Deep Neural Network. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 167-174.

### Abstract

Load forecasting is the foundation of utility design, and it is a fundamental business problem in the utility industry. Load forecasting, mainly referring to forecasting electricity demand and energy, is being used throughout all segments of the electric power industry, including generation, transmission, distribution, and retail. In this paper, a long short-term memory network with a hybrid approach is improved with a dense algorithm and proposed for electricity load forecasting. A long short-term memory network is designed to effectively exhibit the dynamic behavior of load time series. The proposed model is tested for Panama study including historical data and weather variables. The prediction accuracy is validated by performance metrics, and the best of the metrics are attained when mean absolute error is 5.262, mean absolute percentage error 0.0000376, and root mean square error 18.243. The experimental results show a high prediction rate for load balance forecasting of electric power consumption.

**Keywords:** Dense layer, Load forecasting, Long short-term memory, Machine learning

### Hibrit Derin Sinir Ağına Dayalı Yük Dengesi Tahmini

#### Öz

Yük tahmini, hizmet tasarımının temelidir ve hizmet sektöründe temel bir iş sorunudur. Ağırlıklı olarak elektrik talebini ve enerjisi tahmin etmeye atıfta bulunan yük tahmini, üretim, iletim, dağıtım ve perakende dahil olmak üzere elektrik enerjisi endüstrisinin tüm segmentlerinde kullanılmaktadır. Bu bildiride, hibrit bir yaklaşıma sahip uzun bir kısa süreli bellek ağı, yoğun bir algoritma ile geliştirilmiş ve elektrik yükü tahmini için önerilmiştir. Uzun bir kısa süreli bellek ağı, yükleme süresi serilerinin dinamik davranışını etkili bir şekilde sergilemek için tasarlanmıştır. Önerilen model, tarihsel verileri ve hava durumu değişkenlerini içeren Panama çalışması için test edilmiştir. Tahmin doğruluğu, performans ölçümleriyle doğrulanır ve ölçümlerin en iyisi, ortalama mutlak hata 5,262, ortalama mutlak yüzde hatası 0,0000376 ve kök ortalama kare hatası 18,243 olduğunda elde edilir. Deneysel sonuçlar, elektrik gücü tüketiminin yük dengesi tahmini için yüksek bir tahmin oranı göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Makine öğrenimi, Uzun kısa süreli bellek, Yük tahmini, Yoğun katman

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Nezihe YILDIRAN, [nezihe.kucukyildiran@eng.bau.edu.tr](mailto:nezihe.kucukyildiran@eng.bau.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Recently, forecasting systems behavior have been considered as an important operation in succeeding and getting the desired results in multiple fields, as in predicting the financial affairs of exchanging goods or indication of markets, in business to schedule employees, manage the stockpiled, and forecast the request, in medicine to observe the prevalence of illness, and in meteorology for forecasting weather. Equally, forecasting plays a crucial function in controlling the usage of electric, and electric power purchase in interconnected power system [1]. The term of load forecasting is a technique used by electric utilities or by energy management system (grid operator) to predict the electricity needed to balance the generation and load demand [2]. Lately, deep learning, machine learning, and artificial intelligence techniques own numerous contests, and have been successfully employed in electric consumption load predictions, financial market predictions, and reliability predictions, because of its ability in handling with a huge data and gives the right prediction results [3].

The desired forecasts attain the veritable patterns, and intended relationships, that owns by the historical data, but do not duplicate the previous situations, that will not appear again. In time-series forecasting, there are resemblance between the variant types of application in the field of preprocessing, and the adapted techniques. Forecasting algorithms can be implemented and used only for a specific type of forecasting. In general, there are three main types of forecasting that depends on the type of application and field: short-term, medium-term, and long-term forecasting [4].

Multiple number of researchers develop criteria to perform the operation of load balanced forecasting in a vast number of fields, depending on the utilization of the machine learning algorithms and deep learning. The load forecast models are produced within the use of four supervised machine learning techniques and algorithms including support vector machine (SVM), regression tree (RT), feed forward neural network (FFNN), and

multiple linear regression (MLR) [5]. Recurrent extreme learning machine (RELM) is presented as a proposed method for electricity load forecasting in an accurate manner [6]. Deep learning (DL) along with data mining techniques are obtained for forecasting electricity load and price [7].

Long short term memory (LSTM) with multiple configurations to build the models of forecasting for short to medium-term overall load forecasting is applied to give a solution of the accuracy in load forecasting, in which multiple linear and non-linear machine learning algorithms are used and trained, and the superior baseline is picked, selecting superior features within the use of casing, and embedded feature selection approaches, and at the end the genetic algorithm (GA) is utilized to allocate the best time tardiness, and the count of the LSTM model layers' predictive performance enhancement [8]. A novel model is introduced for measuring load-forecasting based on improved version of LSTM that clearly denoted the recurrent characteristic in the electric load by utilizing many concatenations of entries of time tardiness. An autoregressive model is designed within an Auto-Correlation Function (ACF) to retract consumption and clarify the most pertinent time tardiness to feed the multi-sequence LSTM [9]. A deep recurrent neural network with LSTM units (DRNN-LSTM) model is proposed to forecast gathered residential power load, electric vehicles, energy storage system, and photovoltaic power produce in community micro-grid. To boost the balance of the supply-request, the failures of both PV power outcome, and residential power load are consumed in the model by combining the results of forecasting [10].

In this paper, hybrid deep neural network model is designed and validated. The proposed model is based on LSTM model, and it is improved by using dense layers to attain better performance in feature representation of prediction in electricity forecasting, and considering the time dependencies and consuming, and overcome non-linearity problems as well as the most important achieve a higher forecasting accuracy. The organization of this research article is given as: Section 2 presents the theoretical background. Section 3 describes the



proposed model including algorithm and criteria. The performance of proposed method by using simulation results is demonstrated in Section 4. Finally, the conclusion of proposed research work and future suggestions are given in Section 5.

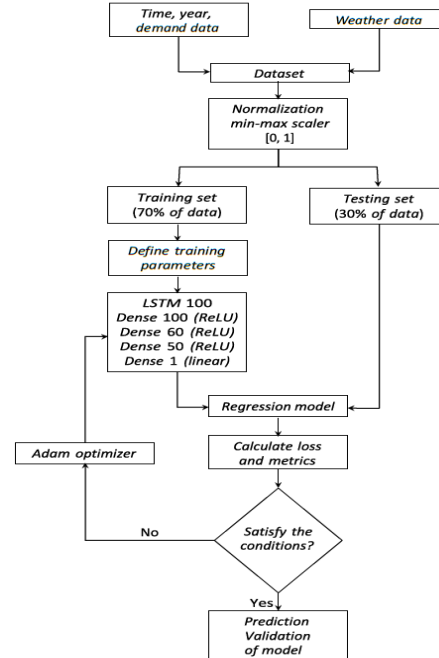
## 2. THEORETICAL BACKGROUND

In general, there are numbers of deep learning algorithms within variant architectures that have been developed and introduced to be applied in many kinds of domains, and the most popular utilized architectures of DL neural networks are conventional neural network (CNN), auto encoder, restricted Boltzmann machine (RBM), and long short-term memory (LSTM) [11]. LSTM was firstly introduced by Hochreiter and Schmidhuber in 1997 to beat the problems of vanishing the gradient, mainly happening when learning using dependencies of long-term, even when the minimum periods of time are too long. It is composed of a set of recurrently linked subsets, noted as blocks of memory. Each block is composed of several cells belonging to the memory that can keep and save the information over an intended period.

Also, networks have gates that are used for controlling the flow of the information through the memory cells of neurons, and basically named as input, output, and forget gate. Every gate of LSTM acquires the same input as the input neuron. Moreover, each of them possesses an activation function [12]. LSTM does not resemble the traditional recurrent unit, because it overwrites its tensor in every time step. The unit of LSTM have the ability to make decision whether to keep the current memory by determined the gates such as, if the input gate notifies a maximum activation, the input will have kept in the cell of memory. If the output gate detects this high activation, it will emit the saved information to the afterward neurons, in another manner if the forget gate observes the intended high activation, the memorycell will be erased [13].

## 3. PROPOSED METHODOLOGY

The proposed model design is considered an important operation, in which it must be illustrated the model in an applicable manner, because of its significant effect when implementing it in real-world applications. The proposed system aims to perform an electricity load forecasting, within the use of the deep learning concept, in which a proposed model that depends on the LSTM algorithm is used to provide a data regression on the attained data set, that contain a description about some effects on the electricity load, and what are the number of loads in the week, month, and year. The system will go through two phases after splitting the data into two groups including data normalization and data regression. Data normalization is performed using max-min normalization technique, in which all the data set elements are first normalized before getting into the regression phase. The data regression phase accomplished using a proposed deep hybrid-based model is implemented, as illustrated in Figure 1.



**Figure 1.** The flow chart of proposed deep hybrid model for load forecasting

### 3.1. Dataset Description

The attained dataset that the proposed load forecasting depending on is illustrated in this section, that known as short-term electricity load forecasting (Panama case study) dataset and can be found as Kaggle dataset.

The main sources of the data obtain the post-transmission of the electricity load, that depends on both of daily, and weekly pre-transmission of generated electricity of load forecast data on a weekly basis, both with hourly subdivisions. The data of time and periods of holidays and school, also weather data is illustrated as an important element in this dataset. The dataset of the electricity forecasting is hourly records, and composed of historical electricity load, historical weekly forecasts, calendar information related to school periods, calendar information related to holidays, weather parameters, including temperature, relative humidity, liquid precipitation, and wind speed of three major cities in Panama (David, Santiago, and Tocumen).

### 3.2. Normalization

Min-max scaler standardization is one of the most popular utilized techniques for data normalization, in which it implements a linear conversion on the basic data, be performing a rescaling operation on the features or on the outcomes in any domain into a new one. Mainly, the features are scaled in a range fall in between  $[0, 1]$ , or  $[1, 1]$ . When min-max method is implemented, every feature stays the same, while obtaining place in the new domain, by considering that all the relational properties in the data are still without changing [14]. When the feature has a constant value in a determined data, it should be ejected, due to that it does not give any information, and min-max normalization has the benefit of maintaining the exact relationships exist in the data, and can be computed with Equation (1) where  $X_{\min}$  denotes the minimum value in X feature, and  $X_{\max}$  is the maximum value in X feature [15].

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

### 3.3. Regression Model

The neural network methods are the most prevalent in the models of Artificial Intelligence (AI) that attained to give a solution for the problems of time series that are nonlinear. Furthermore, if there are variety of hidden layers, the neural networks do not operate in an acceptable manner, due to the technique of the back propagation. It may consume too long time, and in many cases, it gets local minimum with a poor count, and slow concourse, because of the random initialization. To solve the complexity problems facing when dealing with machine learning, deep learning architectures considered to be as the best choice for it.

In neural networks, Long Short-Term Memory considered to be one of the main categories that can be utilized in deep architecture for data regression purpose. A proposed model that depends on the LSTM as well as dense network is introduced in this research to perform data regression and provide an accurate prediction result for the electricity forecasting. The designed model of network is a back propagation type, in which the weights related to a determined network communications are repeatedly regulated to decrease the difference between the original output vector of the determined net, and the requested output vector. In general, there are some important variables and functions of the deep LSTM, such as activation function, optimizer, and dense layer.

Activation function basically exists in the core of deep networks and give the network the ability to learn the complicated mappings operation. Mainly, it is described as mathematical equations utilized to decide the outcome of the intended neural network, connect to every neuron in the network, locate whether it must be activated or not. There are various activation functions, and two types of activation functions (linear and rectified linear unit) are utilized in the proposed system. The simplest activation function is simply a linear transform on the data. The linear activation used for linear regression tasks and has a limited form solution. Rectified linear unit (ReLU) is non-linear activation function, employed in the neural networks having a variety of layers. The major concern is that ReLU function does not give the ability to activate all the

neurons at the same intended amount of time. However, ReLU function can accelerate the training speed of deep neural networks with a comparison within the traditional kinds. Additionally, ReLU function does not urge the problem of vanishing gradient when the count of layers grows more, due to this function does not have a close upper and lower bounds in their ranges. The important purposes to prefer ReLU are gradient stability and low computational complexity.

Optimizer is an algorithm, or an approach utilized to change the parameter related to the neural network including weights along with learning rate to minimize the value of losses. In general, the optimizers are implemented to solve optimization problems by reducing the amount of functionality. One of the methods is adaptive moment estimation (ADAM) optimizer and it operates by calculating the rates related to the adaptive learning for every parameter to keep and save the exponentially average deterioration of the previously squared gradients value along with the exponentially deterioration average of the prior gradients value.

Dense layer is also known as the fully connected layer communicating within the dense circuits to attain a feature map from all prior layers to all posterior layers. As a result, the model can have the ability in defining the relationships exist between the values describing the data in a simple manner when the intended model is operating.

## 4. EXPERIMENTAL RESULTS

### 4.1. Performance Measurements

The evaluation of a specific model in terms of its performance is being done based on certain measurements, and the attained once to evaluate the proposed model includes mean absolute error (MAE), mean squared error (MSE), root mean squared error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE).

### 4.2. Implementation Environment Description

The utilized programming languages to accomplish the proposed system function is Python version 3.6.5. The computer machine, that attained to

perform, and accomplish the proposed system procedures have the type of Lenovo laptop with CORE i7 the seventh generation a 16 GB RAM size and the screen cart is NVIDIA GTX 6G as well as the hard of the computer is SSD and the operating system is Windows 10 64 bit.

### 4.3. Implementation Results Using Proposed Hybrid Deep Neural Network

The proposed deep model is implemented on the electricity load forecasting dataset to provide load prediction in an accurate manner. The deep model has two phases in general: training and testing. Total number of parameters are 71661 and the proposed model layers with respect to number of parameters are given in Table 1.

The data covering nearly five years period in David, Santiago, and Tocumen cities of Panama including historical electricity load, historical weekly forecasts, calendar information related to school periods, calendar information related to holidays, weather parameters, including temperature, relative humidity, liquid precipitation, and wind speed is utilized. The total 582289 data from 03/01/2015 to 28/05/2018 is used for training phase, while the data from 28/05/2018 to 06/10/2020 is separated for testing phase.

### 4.4. Training Phase Results

The system has been trained each time with a different epoch and look back value to provide the best training result within the best time. Epoch refers to cycle through the full training dataset. Look back is the term that show the period illustrate the number of the preceding time steps are attained to predict the posterior time step. Table 2 shows the attained results when implementing the training phase of the proposed system using different epoch and look back values. Whenever epoch is increased the training phase behavior is enhanced and the time required for training the system become less. As well as look back influence the attained results and the accuracy of the training. In general, the best attained result in the training phase is appeared when the epoch equal to 200, and the lock back is 40.

**Table 1.** Proposed deep hybrid model layers

Layer type	Parameter	Output shape
LSTM	52400	(non, 100)
Dense	10100	(non, 100)
Dense	6060	(non, 60)
Dense	3050	(non, 50)
Dense	51	(non, 1)

**4.5. Testing Phase Results**

Testing phase of the proposed system considered to be the most important, in which it provides the electricity load forecasting in its accurate manner, and in an obvious view. The testing phase results are presented by examining the evaluation parameters in Table 3 for epoch in range of 100 to 500 with look back values from 10 to 50.

It is noticed from the prediction results when the epoch is equal to 100, the best result is attained for a look back of 10, and whenever the look back increased the results become worse and the testing prediction result reaches its final value when the look back is equal to 50.

As given in Figure 2, result values for epoch of 200 show that the best result is attained when the look back is equal to 10 and the worst case is shown when the look back is equal to 30 but it is still better than the worst case in epoch of 100 and look back of 50.

Results when epoch is equal to 300 show an enhancement in the attained results for all look back values, and the best result attained when the look back equal to 10, while the worst one is when the look back is 30.

As illustrated in Table 3 for epoch of 400, the best result is obtained when the look back is equal to 10, and it is also the best attained result as shown in Figure 3. The prediction line is nearly identical to the testing line. However, the worst result is attained for epoch of 400 when the look back is equal to 50.

Epoch was not increased more, because there is a slight difference some- times increasing sometimes decreasing in results with epoch of 400, when epoch is equal to 500.

**Table 2.** Training results with various epoch and look back values

Epoch	Look back	MAE	RMSE	Time
100	10	5.090	16.405	88589.95
	20	4.321	10.924	6508.74
	30	12.290	6.019	5711.86
	40	8.732	12.901	4869.84
	50	12.086	15.299	7125.30
200	10	5.020	16.414	9055.91
	20	5.081	10.716	88809.90
	30	9.221	13.268	7010.93
	40	3.407	9.626	12472.09
	50	5.594	10.445	60526.38
300	10	4.615	16.349	5882.70
	20	5.861	11.437	11855.75
	30	6.673	11.553	7530.17
	40	5.500	10.767	18404.54
	50	5.959	10.935	6702.38
400	10	4.494	16.341	4792.02
	20	8.252	13.253	16743.95
	30	5.769	11.498	6967.99
	40	4.659	10.496	7479.41
	50	8.307	11.850	9996.48
500	10	7.382	16.909	5886.55
	20	5.414	10.895	35192.07
	30	3.795	11.151	4733.94
	40	7.760	11.923	6393.03
	50	4.358	10.753	6193.44

**Table 3.** Testing results with various epoch and look back values

Epoch	Look back	MAE	RMSE	MAPE
100	10	5.957	18.462	0.0000399
	20	6.990	18.390	0.0000483
	30	8.610	20.106	0.0000747
	40	11.363	20.101	0.0000518
	50	14.502	22.090	0.0000657
200	10	5.842	18.292	0.0000443
	20	7.830	18.136	0.0000444
	30	11.671	19.754	0.0000791
	40	6.355	17.374	0.0000580
	50	9.111	19.386	0.0000712
300	10	5.454	18.245	0.0000400
	20	8.029	18.322	0.0000461
	30	9.536	19.578	0.0000791
	40	8.239	19.079	0.0000525
	50	8.721	19.466	0.0000600
400	10	5.262	18.243	0.0000376
	20	9.880	20.249	0.0000387
	30	8.803	19.268	0.0000557
	40	7.851	21.696	0.0000627
	50	11.258	20.259	0.0000575
500	10	8.311	18.814	0.0000376
	20	8.204	18.957	0.0000522
	30	6.328	19.737	0.0000587
	40	10.156	21.891	0.0000498
	50	7.332	19.728	0.0000595

#### 4.6. Comparison with Linear Machine Learning Model

To further validation the performance of the proposed model, same system with same constraints

is examined by using linear machine learning the simplest and popular algorithm. The proposed model has superior performance in terms of evaluation metrics as shown in Table 4 giving the comparison results of the two models. confirmed.

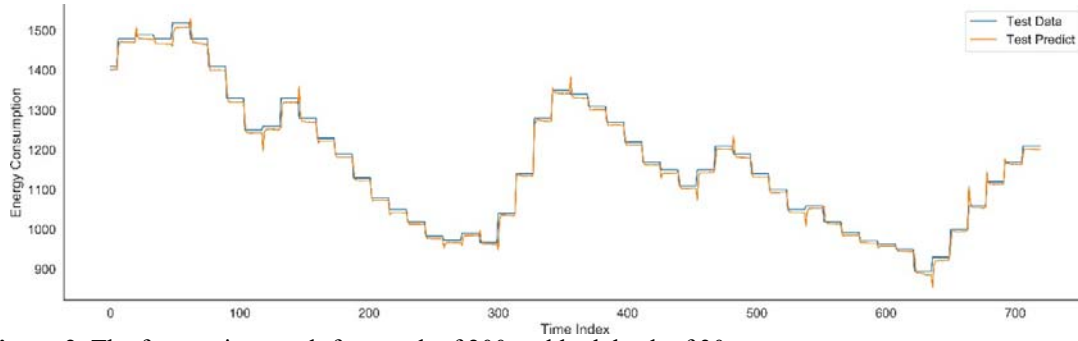


Figure 2. The forecasting result for epoch of 200 and look back of 30

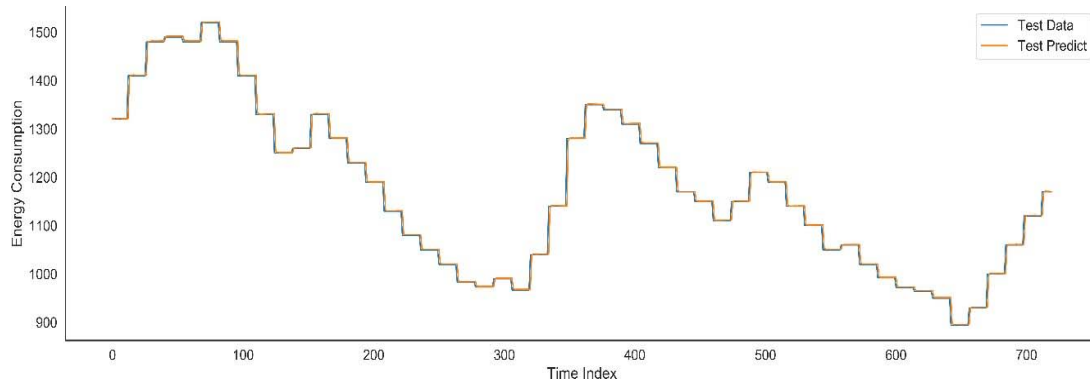


Figure 3. The forecasting result for epoch of 400 and look back of 10

Table 4. Testing results with various epoch and look back values

Model	MAE	RMSE	MAPE
Linear Regression	47.352	65.606	0.0002623
Proposed	5.262	18.243	0.0000376

#### 5. CONCLUSION

Accurate and reliable forecasting for electricity consumption considered an essential operation of energy management. The proposed system is depending on the famous deep learning LSTM network along with dense to provide the best result from the attained dataset. The experimental results show that the proposed deep learning model

depending on the LSTM have a great performance and provide a high prediction results compared with the machine learning algorithm. The attained value of MAE for the proposed deep model is always less than 15 and the worst result of RMSE is equal to 22.090, on the other hand, the best result obtained from the linear regression algorithm is equal to 47.352 for MAE and 65.606 for RMSE. The quality of the proposed deep model for electricity load forecasting reaching high prediction results is shown. When examining the system with epoch of 400, look back period of 10, the attained MAE is 5.262, RMSE is 18.243, and MAPE is 0.0000376. The results indicate nearly perfect prediction and the test prediction line is very close to the real data line.

## 6. REFERENCES

1. Kuster, C., Rezgui, Y., Mourshed, M., 2017. Electrical Load Forecasting Models: A Critical Systematic Review. *Sustainable Cities and Society*, 35, 257-270.
2. Fiot, J., Dinuzzo, F., 2016. Electricity Demand Forecasting by Multi-task Learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 544-551.
3. Dedinec, A., Filiposka, S., Dedinec, A., Kocarev, L., 2016. Deep Belief Network Based Electricity Load Forecasting: An Analysis of Macedonian Case. *Energy*, 115, 1688-1700.
4. Armstrong, J., 2001. Selecting Forecasting Methods. In *Principles of Forecasting*, Springer, 365-386.
5. Idowu, S., Saguna, S., Ahlund, C., Schelen, O., 2016. Applied Machine Learning: Forecasting Heat Load in District Heating System. *Energy and Buildings*, 133, 478-488.
6. Ertugrul, Ö., 2016. Forecasting Electricity Load by a Novel Recurrent Extreme Learning Machines Approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 78, 429-435.
7. Zahid, M., Ahmed, F., Javaid, N., Abbasi, R., Kazmi, H., Javaid, A., Bilal, M., Akbar, M., Ilahi, M., 2019. Electricity Price and Load Forecasting Using Enhanced Convolutional Neural Network and Enhanced Support Vector Regression in Smart Grids. *Electronics*, 8(2), 122.
8. Bouktif, S., Fiaz, A., Ouni, S., Serhani, M., 2018. Optimal Deep Learning LSTM Model for Electric Load Forecasting Using Feature Selection and Genetic Algorithm: Comparison with Machine Learning Approaches. *Energies*, 11(7), 1636.
9. Bouktif, S., Fiaz, A., Ouni, S., Serhani, M., 2019. Single and Multi-sequence Deep Learning Models for Short and Medium Term Electric Load Forecasting. *Energies*, 12(1), 149.
10. Wen, L., Zhou, K., Yang, S., Lu, X., 2019. Optimal Load Dispatch of Community Microgrid with Deep Learning Based Solar Power and Load Forecasting. *Energy*, 171, 1053-1065.
11. Shrestha A., Mahmood, A., 2019. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures. *IEEE Access*, 7, 53040-53065.
12. Ryu, S., Noh, J., Kim, H., 2016. Deep Neural Network Based Demand Side Short Term Load Forecasting. *Energies*, 10(1), 3.
13. Hochreiter H., Schmidhuber, J., 1997. Long Short-term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
14. Dalton, B., 2019. Data mining: A Preprocessing Engine. *Solid State Technology*, 62(4), 9-16.
15. Liu, Z., 2011. A Method of SVM with Normalization in Intrusion Detection. *Procedia Environmental Sciences*, 11, 256-262.

## Climbing with Robots: A Second Order Controller Design for Accurate Wheel Motion Positioning

Claudia Fernanda YAŞAR\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-8760-2359

<sup>1</sup>Yildiz Technical University, Department of Control and Automation Engineering, İstanbul, Türkiye

Geliş tarihi: 01.05.2023 Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: YAŞAR, C.F., (2024). Climbing with Robots: A Second Order Controller Design for Accurate Wheel Motion Positioning. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 175-187.

### Abstract

Climbing robots have become increasingly important for applications such as inspection, maintenance, and search and rescue in complex environments. This study presents studies on the design of a climbing robotic prototype that utilizes magnetic wheels for wall attachment and model-based control using algebraic second-order regulators for robust, accurate and fast positioning. The control approach uses the dynamics of the driving system with DC motors subject to high disturbance, including real physical constraints such as Coulomb friction, magnetic forces, and gravity. This controller uses pre-generated soft inputs in the form of high-order Bezier curves to reduce stall motor torques. Simulations of the robotic system's dynamic models were conducted using MATLAB, and experimental validation of the model-based control method was performed. The study validates the use of algebraic second-order controllers for monophasic DC motors to control the positioning of a climbing system subjected to high perturbations.

**Keywords:** Climbing robots, Motion control, Second order controllers, Robust control, Wheel positioning

### Tırmanma Robotları: Hassas Tekerlek Konumlandırması için İkinci Dereceden Kontrolör Tasarımı

#### Öz

Tırmanma robotları, zorlu ortamlarda denetim, bakım ve arama kurtarma gibi uygulamalar için giderek önemli hale gelmiştir. Bu çalışma, duvara tutunmak için manyetik tekerleklere sahip bir tırmanma robotu sisteminin tasarımı ile dayanıklı, doğru ve hızlı konumlandırma için cebirsel ikinci dereceden model tabanlı kontrolör uygulamasını ele almaktadır. Kontrol yaklaşımı oluşturulurken, Coulomb sürtünmesi, manyetik kuvvetler ve yerçekimi gibi gerçek fiziksel kısıtlamalar da dâhil olmak üzere yüksek bozuculara maruz kalan DC motorlu sürüş sisteminin dinamik bir modeli göz önüne alınmaktadır. Bu kontrol yaklaşımında, durma motor torklarını azaltmak için yüksek dereceli Bezier eğrileri şeklinde önceden oluşturulmuş yumuşak girdiler kullanılmaktadır. Robotik sistemin dinamik modellerinin benzetim çalışmaları MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş ve model tabanlı kontrol yönteminin deneysel uygulaması yapılmıştır. Bu

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Claudia Fernanda YAŞAR, [cfyasar@yildiz.edu.tr](mailto:cfyasar@yildiz.edu.tr)

çalışma, yüksek bozucuların etkilediği bir tırmanma sisteminin konumlandırılmasını kontrol etmek için monofaze DC motorlar için cebirsel ikinci dereceden kontrolörlerin kullanımını ele almaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tırmanma robotları, Hareket kontrolü, İkinci dereceden kontrolörler, Dayanıklı kontrol, Tekerlek konumlandırma

## 1. INTRODUCTION

Wall-climbing robots are mainly employed for risky and expensive tasks when executed by humans. Some of the risky jobs embrace maintenance of storage structures assessment of enormous concrete and metallic constructions such as bridges and cooling towers or dams, and examination in limited spaces. A large number of climbing robots exist in the literature, for example, robotic systems that move around on edifices, ship exteriors and many other human-made structures. The majority of climbing robots have a practical application [1]. These robots are generally used for inspection and maintenance in the ship and plane industry, petrochemical or steel surfaces of tanks, etc. [2]. Wall climbing robots with an inspection system are capable of performing non-destructive maintenance on vessels, reservoirs, scrubbers, pipelines and more. Employing sensory fusion, the climbing system can examine and measure degradation when reporting wall thickness, cracking and pitting.

The climbing robot must be enhanced with an adhesion system that sticks the robot to the wall [3,4]. This design has to consider mechanic components that adapt according to the specific surface. The mechanics of the robot and its dimensions must consider additional loads because it has to carry the necessary hardware and it is going to be affected by extra force changes coming from robot positioning (head-angle and gravity issues). The control system must be robust to high disturbances because of the friction, the magnetic forces and the gravity forces. Since the overall motor disturbance is changing in linear and nonlinear patterns, the interaction process must have strong nonlinearities [5]. Nonlinear phenomena of the Coulomb friction and the effects of gravity have a strong influence on climbing robots making them very difficult to control.

There have been multiple climbing robot designs with diverse locomotion principles. The main principles include systems that relay on arms with grippers [6], legs [7], weld lines [8], chains [9], caterpillar robots [10], wires and riels [11], etc. Arms and legs are by nature coping with the climbing strategy of insects or geckos that can ascend vertically [12]. Robots with forelegs are flexible to the surface structure and capable of bypassing obstacles. Each foot is designed separately, and equipped with adhesive components considering anticipated traction force. However, the number of degrees of freedom increases and leads to intricate mechanics and complex control designs. This also means increased weights and torques. In legged robots, the speed is reduced when compared to other ways of locomotion.

Climbing robots that make use of wheels and chains [13,14] are used on relatively smooth surfaces for fast and continuous movements. Many climbing robots use wheels or chain-driven locomotion along with locomotion and adhesion, in which the robot is equipped with suction elements [15] or uses magnetic wheels [18]. However, these systems cannot perform outsized movements or overcome objects and are exposed to slip effects.

Classical control techniques and PID controllers can be used to design effective controllers for monophasic DC motors [17]. These controllers can be tuned to achieve the desired motion or speed performance characteristics to provide stable and precise control of the motor, using tuning multiple methods. An important issue that affects motor control performance is the tuning method used to optimize control parameters.

Among the tuning methods available for motor controllers are the manual tuning method, auto-tuning, and model-based tuning. The manual method adjusts control parameters iteratively until the desired performance is achieved. This is a process that involves time and a level of expertise



in control theory. The auto-tuning method uses algorithms to automatically adjust the control parameters based on the system's response to a set of predefined input signals. It is a more efficient method than manual tuning, as it can quickly find the optimal control parameters with less human intervention. However, auto-tuning may not be suitable for systems with complex dynamics or nonlinearities. The model-based tuning approach involves using mathematical models of the system to predict the optimal control parameters. Model-based tuning can provide highly accurate and robust control performance but requires detailed knowledge of the system dynamics and accurate mathematical models.

Classical control techniques can also be used to design other types of controllers, such as lead-lag compensators [19,20] and state-space controllers [21,22]. Lead-lag compensators are used to enhance stability and control time response, while state-space controllers are used to control the dynamics of the system by modelling it as a set of state equations. Fractional controllers can also be considered as a type of robust controller due to their ability to provide improved performance and stability in uncertain systems [18]. The use of fractional calculus in the controller design allows for the incorporation of non-integer order dynamics, which can account for the uncertainties and variations in the system.

The application of various motion control techniques, such as fuzzy PID control [23], adaptive sliding mode control [14], neural network-based control [25], and adaptive fuzzy along with sliding control for motion control of different types of robots and unmanned vehicles [26,27]. These techniques aim to extend the control's performance and robustness and to address the challenges posed by the uncertainties and nonlinearities of the control system. There is no need for any filtering for the measured values coming from the motor feedback.

This study presents the design and implementation of a simple climbing robotic prototype, with a magnetic wheel-based adhesion method to climb a metallic wall. The system consists of hardware, software, communication algorithms, and a sensory

system based on motor encoders, which give feedback to the control system. The control approach employs a model-based control technique utilizing a reduced model of the driving system with two DC motors that are subject to high disturbances. In the work by Sira-Ramirez [28], very precise and fast Generalized Proportional Integrator (GPI) regulators are tuned using a simple algebraic methodology and are employed for tracking closely a particular reference, as well as being robust to system perturbations. These GPI controllers have been also tested for very demanding accurate trajectories for flexible beam positioning and minimal vibration [29].

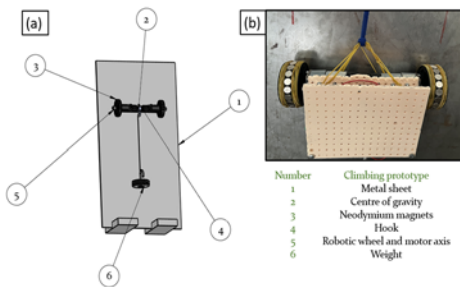
This research conducts a comprehensive study of a system that includes the consideration of real physical constraints such as Coulomb friction, magnetic forces, inertia changes, and system uncertainties. In addition, this work employs simulations of the robotic system's models and control approach to guide system implementation and compare with the real-time robotic system. Furthermore, experimental validation of the dynamic models uses the platform motor's parameter estimated through experiments, and the validated dynamics are utilized for the model-based control method. Additionally, the research validates the use of algebraic GPI regulators for monophasic DC motors to control the positioning of the robotic system subjected to high perturbations. This regulator is a second-order control method to control the position of the wheels under high non-linear disturbance. This approach is an output feedback scheme that uses the measured position of the motor using an encoder. This method does not use the disturbance model as an external compensation term. The unknown friction torque and overall disturbance are not required. There is no need for any filtering for the measured values coming from the motor encoder's feedback. This work is presented as follows: Section 2 describes the experimental climbing system. Section 3 explains the dynamic model of the system. In Section 4, the control system and its parameters are given. Section 5 presents the significant experimental results attained using the control method. The important conclusions are written in Section 6.

## 2. EXPERIMENTAL CLIMBING PLATFORM

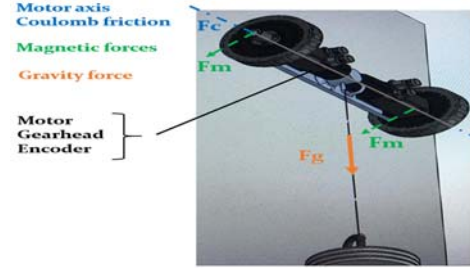
This section outlines the experimental design of a climbing robotic prototype that uses two magnetic wheels. It provides information on the robot's mechanisms and features, as well as the control hardware and software used for the proposed prototype.

### 2.1. Mechanisms and Features

The robotic mechanisms were designed for a simple experimental platform to examine control-positioning methods for climbing with magnetic wheels. The robot was intended to climb vertical metallic walls composed of steel and was designed with two DC motors to drive the system. The authors selected magnetic adhesion for this climbing robot and noted that the additional weight results from the various extra masses the system must carry to operate, including an H bridge, a plastic base, and cables. To reduce slippage during climbing, the wheels are wrapped in elastic bands and use neodymium permanent magnets. The authors made Solidworks drawings of the robot's mechanisms and features, which are presented in Figure 1 and Figure 2. Solidworks drawings of the vertical climbing platform and its components are shown in Figure 1(a), while Figure 1(b) displays a picture of the experimental climbing prototype. Figure 2 depicts Solidworks drawings of the robotic system subjected to Coulomb, magnetic, and gravity forces.



**Figure 1.** The magnetic wheeled climbing robot: (a) Solidworks drawings of the metallic climbing platform and the robot position, and (b) the picture of the experimental robot



**Figure 2.** Solidworks drawings of the robotic system subjected to several forces.

### 2.2. Control Hardware and Software

The DS1104 control board, which is equipped with an MPC8240 processor and a PPC 603e core, boasts a 64-bit processor CPU, 32MB SDRAM global memory, and 8MB flash memory. The board performs data receiving and transfer operations using the input and output connections provided by the CP1104 connector panel. A PLC and CPU running under Windows are used to operate the system. The climbing robot controllers are programmed with Control Desk, which runs MATLAB/Simulink 2022(b) under Microsoft Windows 10, INTEL Core (TM) i5-7400 CPU, 3.00 GHz, and 8 GB RAM. The sampling time for real-time applications is  $T_s = 1$  ms.

The control hardware includes a set of two 24 V brushed Pololu monophasic motors with a metal gearbox (18.75:1 reduction), incremental quadratic encoders with a resolution of 64 counts per revolution of the motor shaft, and an L298N Dual H-Bridge Motor driver to control the motors. The PWM signal received from an I/O Digital/Analog board is averaged to provide a proportional value of the 24 V provided by a power supply. Two incremental encoder counters are used to measure the motor's position and provide feedback to the control system.

## 3. DYNAMIC MODEL

This section explains a simplified model of the DC servomotor system, specifically addressing motors that are subjected to substantial disturbances. Additionally, a comprehensive depiction of the total disturbance that may affect the motor is provided.

The attainment of an accurate dynamic model, which incorporates optimal model parameters, is crucial for the implementation of a model-based control tuning approach, aimed at achieving precise and resilient control performance.

### 3.1. DC Motor Dynamics

A DC motor is an electromechanical component that yields an angular displacement output  $\theta_i$  for a current input  $i_{ai}$ , that is, a mechanical output generated by an electrical input. In the literature, the equation related to the electrical dynamics of the motor is found to be:

$$v_{mi} = R_{ai}i_{ai} + L_{ai} \dot{i}_{ai} + K_{bi}\dot{\theta}_i \quad (1)$$

where  $i=1,2$  is a value for each of the two motors. The applied armature voltage is denoted as  $V_{mi}$ , and the back electromotive force (emf) voltage is  $V_{bi}(s) = K_{bi}\dot{\theta}_i$  where  $K_{bi}$  is the back emf constant.  $R_{ai}$  and  $L_{ai}$  are the armature resistance and inductance, respectively. The mechanical dynamics of the DC motor are described as

$$\Gamma_{mi} = K_i i_{ai} = J_i \ddot{\theta}_i + v_i \dot{\theta}_i \quad (2)$$

The variable  $\Gamma_{mi}$  denotes the total torque of each of the motors. Here, the motor constant is denoted as  $K_i$ .  $J_i$  stands for the rotor's inertia, while  $v_i$  denotes the viscous friction parameter. To obtain a model that relates the motor and angular position  $\theta_i$  and the supplied voltage  $v_{mi}$ , the following assumptions have been made in the literature [30]:  $K_{bi} = K_i$  and  $L_{ai} \approx 0$ . By using the Laplace transform the previous equations are yielded

$$v_{mi}(s) = R_{ai}I_{ai}(s) + L_{ai} \dot{I}_{ai}(s) + K_i \dot{\theta}_i(s) \quad (3)$$

$$I_{ai}(s) = \left( \frac{J_i s^2 + v_i s}{K_i} \right) \theta_i(s) \quad (4)$$

Replacing (4) in (3) and simplifying, the following transfer function is obtained:

$$\frac{\theta_i(s)}{v_{mi}(s)} = \frac{\frac{K_i}{R_{ai} L_{ai}}}{s \left[ s + \frac{1}{J_i} \left( v_i + \frac{K_i^2}{R_{ai}} \right) \right]} = \frac{A_i}{s(s + B_i)} \quad (5)$$

A simplification can be made since  $A_i$  and  $B_i$  are obtained using motor parameters  $A_i = \frac{K_i}{R_{ai} L_{ai}}$  and  $B_i = \frac{1}{J_i} \left( v_i + \frac{K_i^2}{R_{ai}} \right)$ .

A simplified transfer function  $\frac{\theta_i(s)}{v_{mi}(s)}$  of a DC motor is, therefore, mathematically formulated in (5). This is the transfer function that will be used in this work and the missing part is the experimental parameter identification to find the values  $A_i$  and  $B_i$  that best represent real DC motor dynamics.

### 3.2. Wheel Disturbance While Climbing: Adding External Disturbance

The simplified DC model obtained in (6) is used but external disturbances affect the system while climbing, as follows:

$$\Gamma_{mi} = K_i v_{mi} = J_i \ddot{\theta}_i + v_i \dot{\theta}_i - \Gamma_{fi}(\dot{\theta}_i, v_{mi}) - \Gamma_{ji}(v_{mi}) - \Gamma_{gi}(\theta_i) \quad (6)$$

The external disturbance torques are taken into account to give the system realistic climbing behaviour. For instance the increased rotor's inertia due to the effect of external torques, such as the magnetic forces that keep the robotic system on the metallic wall, changes in inertia due to motor positioning (such as changes in the robot's head-angle).  $\Gamma_{ji}(v_{mi})$  stands for the external torque out to changes in the rotor's inertia.  $\Gamma_{gi}(\theta_i)$  denotes the effects of gravity on each of the motors. Therefore, the overall disturbance is depicted as

$$\Gamma_{ai} = \Gamma_{fi}(\dot{\theta}_i, v_{mi}) + \Gamma_{ji}(v_{mi}) + \Gamma_{gi}(\theta_i). \quad (7)$$

The overall disturbance often results in issues related to motion control, such as steady-state errors and overshooting. The Coulomb friction model is a function of the angular speed and control signal [31].  $\Gamma_{fi}(\dot{\theta}_i, v_{mi})$  can be mathematically expressed as follows:

$$\Gamma_{fi}(\dot{\theta}_i, v_{mi}) = \begin{cases} g_i(\dot{\theta}_i) & \text{if } \dot{\theta}_i \neq 0 \\ \Gamma_{si} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_i) & \text{if } \dot{\theta}_i = 0 \text{ \& \& } |v_{mi}| \leq \frac{\Gamma_{si}}{K_i} \end{cases} \quad (8)$$

$$g_i(\dot{\theta}_i) = \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_i) \Gamma_{ci} + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_i) (\Gamma_{si} - \Gamma_{ci}) e^{-\left( \frac{|\dot{\theta}_i|}{v_{si}} \right)}$$

The proposed model incorporates several friction-related parameters, including  $\Gamma_{si}$ , which represents the static friction torque that gives rise to stiction phenomena when at  $\dot{\theta}_i = 0$ . Coulomb friction, denoted as  $\Gamma_{ci}$ , occurs during motion and remains constant regardless of speed. The Stribeck velocity,  $v_{si}$ , represents the sliding velocity at which only 37% of the static friction torque is active. The main DC motor parameters are given in Table 1.

### 3.3. DC Model and Overall Disturbance Compensation

There are two main approaches with which to deal with the compensation of the overall disturbance: first, the cancellation based on a model of the total disturbance, using its estimation and compensation; and second, the design of controllers that are robust to these effects. The first of these approaches is difficult to apply since accurate models of the total disturbance include, for example, friction with linear and non-linear patterns. To address this, high-order controllers can be employed which are controllers that compensate for the total disturbance without a prior model or estimation. In this work, the use of high-order controllers is adopted. The DC servo-motor model, its disturbance torques acting on the system, and the parameters and variables defining the simplified model are depicted in Figure 3.

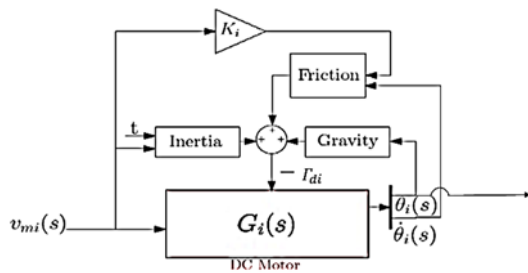


Figure 3. Block diagram: DC motor dynamics under disturbance

The system requires extra voltage to compensate for disturbances  $\vartheta_i = v_{mi} + v_{fi} + v_{ji} + v_{gi}$ , where  $\vartheta_i$  is the fictitious control signal of the motor required for compensation. In Figure 4, a block diagram that explains the compensation at the motor side is presented.

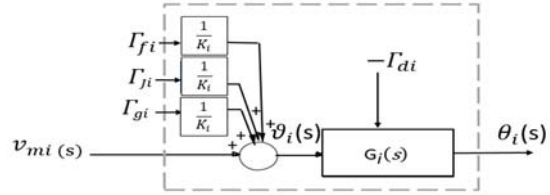


Figure 4. DC motor compensation for overall disturbance

Given that both the internal friction force and the overall disturbance (7) are adjusted, a reduced and linear differential of second order equation is derived as

$$K_i v_{mi} = J_i \ddot{\theta}_i + v_i \dot{\theta}_i \quad (9)$$

Using the Laplace transform the following equation is obtained

$$K_i v_{mi}(s) = J_i s^2 \theta_i(s) + v_i s \theta_i(s) \quad (10)$$

The transfer function  $G_i(s)$  represents a simple model of the DC motor as a linear system and can be obtained from the input voltage  $v_{mi}(s)$  to the resulting position  $\theta_i(s)$

$$G_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{v_{mi}(s)} = \frac{K_i/J_i}{s(s + v_i/J_i)} = \frac{A_i}{s(s + B_i)} \quad (11)$$

The open-loop response of this system is not stable. One of the poles of the open-loop transfer function is on the left half of the complex  $s$ -plane, while the other is at the origin and behaves like an integrator. Therefore, when a step input is given its output continues to grow to infinity in the same manner that an integral of a constant grows to infinity.

### 3.4. DC Motor Parameter Identification: Obtaining a Reduced Experimental Dynamic Model

The robotic platform was equipped with two DC motors. MATLAB's Parameter Estimation was used to obtain motors' parameters using an experimental identification. Note: It is almost impossible to obtain a complete identification of each of the disturbances of the wheels. Therefore,

experiments are performed to obtain a close representation of the motor system. It is necessary to determine the parameters  $A_i$  and  $B_i$  of the modelled transfer function in (11), and add at least the static value of the Coulomb friction for a reduced motor model, as follows:

$$\Gamma_{mi} = K_i v_{mi} = J_i \ddot{\theta}_i + v_i \dot{\theta}_i - \Gamma_{si} \quad (12)$$

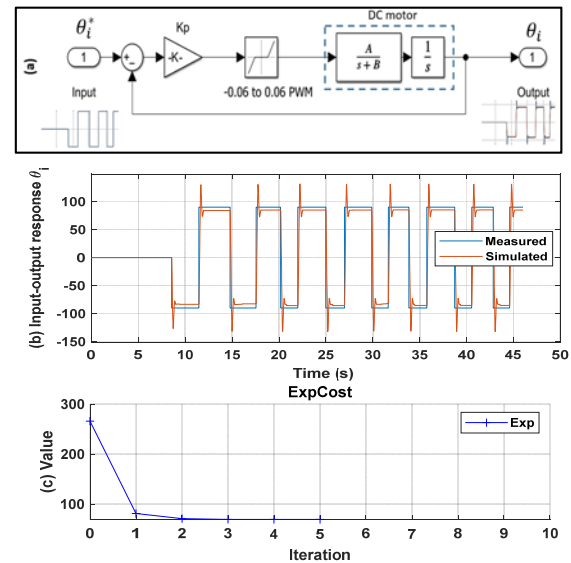
$\Gamma_{si}$  represents the total torques induced by non-linear static friction in motors. In this study, these characteristics are modified to bring the reduced plant model as near to the real plant as feasible using an iterative identification process. The method is based on experiments that employ a basic closed-loop Proportional (P) controller structure, which differs from traditional open-loop approaches for parameter identification. This decision is made to allow a comparison of real and simulated systems within a closed-loop arrangement.

The first part of the experimental data is to attain the static value of the Coulomb friction. Each motor was heated up to aid the parameter identification process. Then, a PWM control signal,  $v_{mi}(s)$ , was applied to the motors in an open loop during the experiment, with positive and negative PWM values used for clockwise and counterclockwise motor movements, respectively. The process starts by giving very low values until the motor starts moving. The static values are PWM values right when the motor starts moving  $\Gamma_{si} = \pm 0.06$  PWM.

Figure 5(a) displays the simulated closed-loop control for the reduced motor plant, as well as the controlled system response, with the experimental and simulated control responses matching to some extent. Simulated and real systems are kept comparable by employing the same proportional gains  $K_p = 0.005$  and including a dead zone that simulates the static component of Coulomb friction.

The second part of the experimental identification method requires multiple experiments to achieve sufficient data to attain approximated parameters of the motors. To include clockwise and anticlockwise control responses, the experimental controller is subjected to a series of input steps that include both

positive and negative values. The recorded motor input-output control data (time, reference, and output) is used as input-output for Simulink. The MATLAB parameter identification toolbox induces iterative variations in  $A_i$  and  $B_i$  to approximate the outcomes to those of the real system, as shown in Figure 5(b). The toolbox is configured to operate using a sum of square errors cost function; with the optimization method selected as non-linear least squares. The cost function iterates to find the optimal parameters that make the simulated and real model equivalent. The parameter and function tolerance is 0.001, and the maximum iteration is 100. The temporal cost function values are depicted in Figure 5(c). The resultant model is claimed to be the best-reduced model discovered by applying this procedure with parameter identification of  $A_i$  and  $B_i$  values, which are used for control purposes in this research methodology. The DC motor characteristics for both wheels are shown in Table 1.



**Figure 5.** Experimental parameter identification,  $A_i$  and  $B_i$ , using the parameter identification toolbox of MATLAB: (a) closed-loop method based on proportional control; (b) input-output comparison for the experimental and simulated response; and (c) experimental cost function iteration by time

**Table 1.** DC motor model parameters

Motor left $i=1$	Value (units)
Parameter $A_1$	159 $\frac{\text{N}}{\text{V.kg.m}}$
Parameter $B_1$	11 $\frac{\text{N.s}}{\text{kg.m}}$
Control signal ( $v_{m1}$ )	1 to -1 PWM
Static friction torque ( $T_{s1}$ )	-0.06 ve 0.06 PWM
Motor axis inertia ( $J_1$ )	0.0018 kg. m <sup>2</sup>
Motor constant ( $K_1$ )	0.474 N. m/V
Coulomb friction torque $\Gamma_{c1}$	0.0238 N. m
Stribeck velocity ( $v_{s1}$ )	0.0105 rad/s
Motor Right $i=2$	Value (units)
Parameter $A_2$	260 $\frac{\text{N}}{\text{V.kg.m}}$
Parameter $B_2$	13 $\frac{\text{N.s}}{\text{kg.m}}$
Control signal ( $v_{m2}$ )	1 to -1 PWM
Static friction torque ( $T_{s2}$ )	-0.06 to 0.06 PWM
Motor axis inertia ( $J_2$ )	0.0018 kg. m <sup>2</sup>
Motor constant ( $K_2$ )	0.474 N. m/V
Coulomb friction torque $\Gamma_{c2}$	0.0238 N. m
Stribeck velocity ( $v_{s2}$ )	0.0105 rad/s

#### 4. ALGEBRAIC SECOND ORDER CONTROLLERS

This study involves the simulation and implementation of 2-DOF algebraic PID controllers for DC monophasic motors. The objective of the design is to ensure accurate tracking of references while compensating for disturbance effects, critically damped control response with short settling time, and minimal steady-state error and overshoot. The proposed control system is required to be robust to overall disturbance through a second-order and high-gain closed-loop controller. The study utilizes various techniques to achieve these objectives, such as the use of Bezier curves for reference inputs, and comprehensive identification of motor parameters including Coulomb friction. Fast and stable responses are mandatory, therefore, the poles and allocated far from the origin and at the left side of the complex plane, while considering the sampling time ( $T_s = 1$  ms) and motor saturation limits (1 to -1 PWM).

The given reduced motor dynamics is denoted by  $G_i(s)$  and its associated parameter values are given

in Table 1. Figure 6, illustrates the algebraic PID controller, and its tuning methodology was previously described in Castillo-Berrio [29]. The transfer function of the motor dynamics was then derived as:

$$G_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{v_{mi}(s)} = \frac{A_i}{s(s+B_i)} = \frac{g_{ni}(s)}{g_{di}(s)} \quad i = 1,2 \quad (13)$$

where  $A_i$  and  $B_i$  are each of the motor parameters to describe the second-order experimental plant.  $g_{ni}(s)$  is the numerator and  $g_{di}(s)$  is the denominator of  $G_i(s)$ . The controller's polynomials  $n_{1,i}(s)$ ,  $n_{2,i}(s)$  and  $d_i(s)$  are defined as follows:

$$n_{1,i}(s) = a_{2,i}s^2 + a_{1,i}s + a_{0,i} \quad (14)$$

$$n_{2,i}(s) = b_{2,i}s^2 + b_{1,i}s + b_{0,i} \quad (15)$$

$$d_i(s) = s(s + c_{a,i}). \quad (16)$$

Here,  $a_{0,i}$ ,  $a_{1,i}$ ,  $a_{2,i}$ ,  $b_{0,i}$ ,  $b_{1,i}$ ,  $b_{2,i}$  and  $c_{a,i}$  are coefficients. The input reference for the controller is represented by  $\theta_i^*(s)$ , while the motor output is denoted as  $\theta_i(s)$ . Reference inputs are chosen based on Bezier curves due to their ability to accurately represent smooth and challenging trajectories.  $M_i(s)$  is a fourth-order transfer function and can be expressed as:

$$M_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_i^*(s)} = \frac{G_i(s)n_{1,i}(s)}{d_i(s) + G_i(s)(n_{1,i}(s) + n_{2,i}(s))} \quad (17)$$

This is a closed-loop transfer function whose characteristic equations have four poles each of them placed in  $p_i$ . The control settings are then

$$d_i(s)g_{di}(s) + g_{ni}(s)(n_{1,i}(s) + n_{2,i}(s)) = (s - p_i)^4 \quad (18)$$

$d_i(s)$  includes a root at the origin. Equation (18) offers four conditions to tune seven parameters. Multiple real poles all placed on the left side of the complex plane are selected to provide critically damped responses. Replacing all the parameters in the closed-loop transfer function of the controlled system the following transfer function is obtained

$$M_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_i^*(s)} = \frac{A_i(a_{2,i}s^2 + a_{1,i}s + a_{0,i})}{s^4 + (c_{a,i} + B_i)s^3 + (c_{a,i}B_i + a_{2,i}A_i + b_{2,i}A_i)s^2 + (a_{1,i}A_i + b_{1,i}A_i)s + (a_{0,i}A_i + b_{0,i}A_i)} \quad (19)$$

The control response must achieve zero static error for both step inputs and step disturbance. Then, using the final value theorem makes it easy to demonstrate the condition  $b_{0,i} = 0$ . Additional conditions are required to be defined, for instance, by selecting  $n_{1,i}(s)$  to make the gain of  $M_i(s)$  equal to one, and two zeroes of the transfer function  $M_i(s)$  cancel two poles. The zeroes can be written as

$$s^2 + \frac{a_{1,i}}{a_{2,i}}s + \frac{a_{0,i}}{a_{2,i}} = (s^2 - 2p_i s + p_i^2) = (s - p_i)^2 \quad (20)$$

By matching the coefficients of both sides of the equation the following conditions must be met  $\frac{a_{1,i}}{a_{2,i}} = -2p_i$  and  $\frac{a_{0,i}}{a_{2,i}} = p_i^2$ . Therefore, seven equations to calculate seven parameters are yielded. Then, arranging  $a_{1,i}$  and  $a_{0,i}$  in terms of  $a_{2,i}$  and replacing the conditions in the denominator of the closed loop transfer function characteristic equation is given in terms of the closed loop poles  $p_i$ . The controller parameter equations are given in Table 2.

**Table 2.** Equations to calculate the algebraic second-order controller parameters

$a_{0,i}$	$a_{1,i}$	$a_{2,i}$	$c_{a,i}$
$\frac{p_i^4}{A_i}$	$\frac{-2p_i^3}{A_i}$	$\frac{p_i^2}{A_i}$	$-4p_i$
$b_{0,i}$	$b_{1,i}$	$b_{2,i}$	$-B_i$
0	$\frac{-2p_i^3}{A_i}$	$\frac{-5p_i^2}{A_i} + \frac{(4p_i + B_i)B_i}{A_i}$	

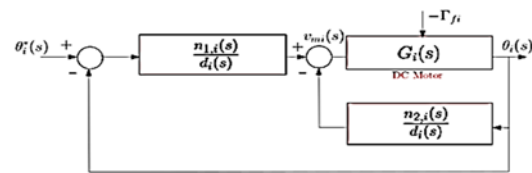
After the zero pole cancellation, the new closed-loop transfer functions denominator is of second order and can be expressed as:

$$\begin{aligned} a_4 &= 1 > 0 \\ a_3 &= (c_{a,i} + 11) > 0 \\ b_1 &= \frac{(159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)(c_{a,i} + 11) - (11 c_{a,i} + 159 a_{2,i} + 159b_{2,i})}{(c_{a,i} + 11)} > 0 \\ c_1 &= (159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i) > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$M_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_i^*(s)} = \frac{1}{(1 + \alpha_i s)^2} \quad (21)$$

In this work, each motor is individually controlled and the closed-loop dynamics may be written as:

$$\theta_i^*(s) = \theta_i(s) + 2\alpha_i \dot{\theta}_i(s) + \alpha_i^2 \ddot{\theta}_i(s) \quad (22)$$



**Figure 6.** Algebraic second-order controller.

This Routh-Hurwitz matrix specifies mathematical conditions for determining whether a particular linear system is asymptotically stable based on the signs of the coefficients of its characteristic polynomial. The system is stable if all of the signs in the first column are positive. Sign alterations indicate the presence of unstable poles. After meeting, the constraints mentioned to derive the algebraic second-order controller parameters in Section 4, and using (18), replacing the motor parameters  $A_i$  and  $B_i$ , and noting that the closed loop poles  $p_i$  must be negative, the following polynomial is obtained:

$$s^4 + (c_{a,i} + 11)s^3 + (11 c_{a,i} + 159 a_{2,i} + 159b_{2,i})s^2 + (159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)s + 159a_{2,i}p_i^2 = P(s) \quad (23)$$

According to the stability criterion used on the Routh Hurwitz matrix's first column obtained

\* If  $c_{a,i} > -11$ , then the system is stable.

\* Let's denote  $N = (159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)(c_{a,i} + 11) - (11 c_{a,i} + 159 a_{2,i} + 159b_{2,i})$ ; the term  $(159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)$  has the same sign as  $(11 c_{a,i} + 159 a_{2,i} + 159b_{2,i})$  because  $p_i$  is always negative. The term  $-(11 c_{a,i} + 159 a_{2,i} + 159b_{2,i})$  is always negative. Then, N has the same sign as  $(c_{a,i} + 11)$  and contributes to stability.

\* The term  $(159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)$  must have the same sign as  $p_i$ . If  $p_i < 0$ , then the term  $(159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)$  is positive. Therefore,  $(159b_{1,i} - 318 a_{2,i}p_i)$  is stable.

## 5. CONTROL SETUP AND RESULTS

The algebraic second-order control's poles and parameters and four multiple poles placed at  $p_i$  for each of the poles and both controllers  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , left and right motor, respectively. Three different experimental cases were performed to test the robotic prototype's control system while climbing a vertical wall made of steel. Table 3 provides the calculated algebraic second-order control parameters.

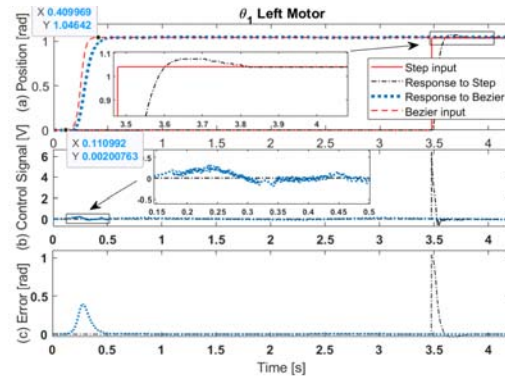
**Table 3.** Algebraic second-order control parameters.

$i$	Poles $p_i$	$a_{0,i}$	$a_{1,i}$	$a_{2,i}$	$b_{0,i}$	$b_{1,i}$	$b_{2,i}$	$c_{a,i}$
$\theta_1$	-50	24038	962	10	0	962	38.7	187
$\theta_2$	-50	39308	1572	16	0	1572	65.5	189

### 5.1. Experimental Case 1: Bezier Curves and Step Input as Control References

Bezier curves are high-order curves that provide smooth profiles that can be utilized as inputs in control systems. In an initial experiment, a fast Bezier curve is employed, with the reference point moving from 0 to  $\pi/3$  radians in 0.3 seconds. This curve serves as the reference input for an algebraic second-order controller and is compared to a simple step input of  $\pi/3$  radians. The performance of the algebraic second-order controller in response to both inputs is shown in Figure 7. Specifically, Figure 7(a) displays the inputs at two time intervals, along with the corresponding controller output responses. The motor controller performs exceptionally well in following the challenging

trajectory and tracking the shape of the Bezier curve. In Figure 7(b), the required control signal to execute the control manoeuvre is depicted. When compared to the step input, the required effort for the pre-designed Bezier curve is substantially lower, with the controller becoming saturated in the case of the step input. Figure 7(c) shows the control errors, with the error being significantly lower when using a pre-designed curve, and considerably higher when using a classical step input. To meet the high-performance requirements for wheel climbing, pre-designed Bezier curves are an essential component of our control strategy.



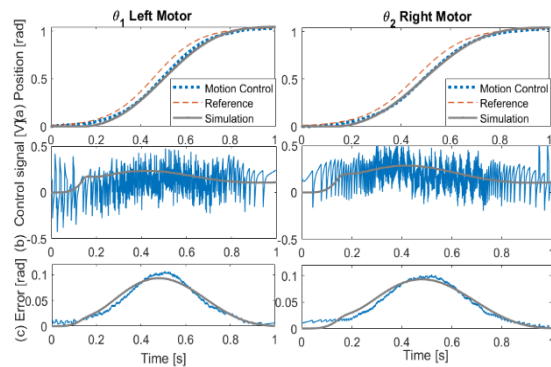
**Figure 7.** Bezier curves and step inputs for motion control performance

### 5.2. Experimental Case 2: Simulation and Real-Time Control Performance

The dynamic models, DC motor models, disturbance models, and designed controllers have been simulated, and the simulation results suggest that algebraic second-order controllers can be used for climbing robotics. The simulation results, which include the performance of both  $\theta_1$  and  $\theta_2$  motors controlled separately, demonstrate that the Bezier inputs, which range from 0 to  $\pi/3$  radians in 0.8 seconds, can be tracked successfully. Figure 8(a) illustrates the system's references and control response for the requested motion manoeuvre, while Figure 8(b) displays the control signal requested for the manoeuvre, which always remained lower than the maximum control limits (PWM +1,-1). In Figure 8(c), the error maximum values were lower than 0.1 radians in both transient responses. These figures demonstrate that the



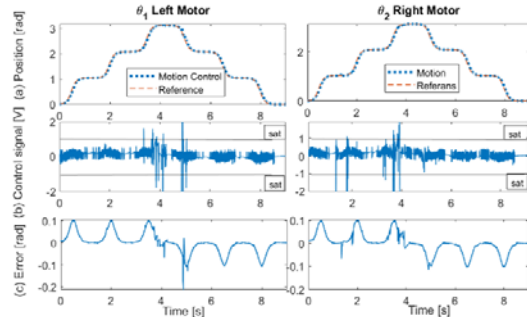
control models have good tracking performance and that the real-time control implementation is effective. The simulation results indicate that the dynamic and control designs are close approximations of the real-time results, and these simulations can be used to represent and actuate the robotic system successfully.



**Figure 8.**  $\theta_1$  and  $\theta_2$  simulation and real-time control performance: (a) Algebraic second-order controller for motion control, (b) Control signal, and (c) controller’s error

**5.3. Experimental Case 3: Evaluating the Transient and Steady State Control Response**

The climbing robotic prototype was tested by performing a long trajectory, during which it climbed three steps up and three steps down, returning to its initial position. Each independent manoeuvre ranged from 0 to  $\pi/3$  radians in 0.8 seconds. Figure 8 illustrates the remarkable control tracking of both controllers for motors,  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , for the long trajectory, allowing for observation of both the transient and steady-state response. Figure 9(a) displays the input-output control results, while Figure 9(b) shows the required control effort. The control signals do not saturate, except for some isolated milliseconds that have minimal effect on control performance. For the majority of the experimental time, the system does not undergo abrupt values that would saturate the motor. The control error only reaches 0.1 radians while surpassing the transients, and is minimal for the steady-state response, as depicted in Figure 9(c).



**Figure 9.**  $\theta_1$  and  $\theta_2$  real-time control performance while performing a log trajectory: (a) Control positioning response, (b) the required control signal, and (c) the control error

**6. CONCLUSION**

This study presents a two-wheeled climbing robot design that utilizes magnetic wheels for wall attachment and algebraic second-order regulators as model-based controllers for accurate motion positioning. The developed system includes hardware, software, communication algorithms, and a sensory system based on motor encoders. The control approach uses a model-based control approach that uses a DC motor driving dynamics and considers real physical constraints such as Coulomb friction, magnetic forces, and gravity forces.

Simulation and experimental validation of the control system while climbing have been performed to support the accuracy of the control approach. The controller employs pre-generated soft inputs in the form of high-order Bezier curves to reduce large stall motor torques when driving the DC motors. The results demonstrate that algebraic second-order regulators can be successfully used for monophasic DC motors to control the positioning of the robotic system subjected to high perturbations. Experimental results show that the control signals remain within the maximum control limits and that the control error is minimal, reaching only 0.1 radians while surpassing the transients. Overall, this research contributes to the field of climbing robotics and offers insights into the development of high-

performance model-based controllers for motion positioning.

Future work will involve the implementation of intelligent control methods to enhance the robustness and accuracy of the controllers, and the assessment of the proposed methods under varying loading conditions in a climbing scenario. Additionally, the system can be extended to develop a fully instrumented and robust four-wheeled robotic prototype.

## 7. ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) under Project 121E450 (3501 - KARIYER GELİSTİRME PROGRAMI).

## 8. REFERENCES

1. Schmidt, D., Berns, K., 2013. Climbing Robots for Maintenance and Inspections of Vertical Structures. A Survey of Design Aspects and Technologies. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1288-1305.
2. Chang, Y., Chen, X., 2015. Design of a Scalable Wall Climbing Robot for Inter-Plane Traversing, *Robotic Welding, Intelligence and Automation. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 363, 309-313.
3. Shen, W., Gu, J., Shen, Y., 2005. Permanent Magnetic System Design for the Wall-Climbing Robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 2078-2083.
4. Yoshida, Y., Ma, S., 2010. Design of a Wall-Climbing Robot with Passive Suction Cups. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 1513-1518.
5. Zheng-Yi, X., Zhang, K., Xiao-Peng, Z. Hao, S., 2015. *Design and Optimization of Magnetic Wheel for Wall Climbing Robot*. Springer International Publishing.
6. Peidró, A., Tavakoli, M., Marín, J.M., Reinoso, Ó., 2019. Design of Compact Switchable Magnetic Grippers for the HyReCRo Structure Climbing Robot, *Mechatronics*, 59, 199-212.
7. Bi, Z.Q., Guan, Y.S., Chen, S.Z., 2012. A Miniature Biped Wall-Climbing Robot for Inspection of Magnetic Metal Surfaces. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 324-329.
8. Gallegos, G., Sattar, T., Corsar, M., James, R., Seghier, D., 2018. Towards Safe Inspection of Long Weld Lines on Ship Hulls Using an Autonomous Robot. *21st International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2018)*, Panama, 10-12 Sep.
9. Huang, H., Li, D., Xue, Z., Chen, X., Liu, S., Leng, J., Wei, Y., 2017. Design and Performance Analysis of a Tracked Wall-Climbing Robot for Ship Inspection in Shipbuilding. *Ocean Engineering*, 131, 224-230.
10. Wang, W., Wang, Y., Wang, K., Zhang, H., Zhang, J., 2008. Analysis of the Kinematics of Module Climbing Caterpillar Robots. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2008)*, 84-89.
11. Kitai, S., Tsuru, K., Hirose, S., 2005. The Proposal of Swarm Type Wall Climbing Robot System Anchor Climber Design and Examination of the Adhering Mobile Unit. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 475-480.
12. Yu, Z., W., Shi, Y., Xie, J.X., Yang, S.X., Dai, Z.D., 2018. Design and Analysis of a Bionic Adhesive Foot for a Gecko Robot Climbing the Ceiling. *International Journal of Robotics and Automation*, 33, 445-454.
13. Zhang, Y., Dai, Z., Xu, Y., Qian, R., 2019. Design and Adsorption Force Optimization Analysis of TOFD-Based Weld Inspection Robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 1303, The Second International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering 25-27 May 2019, Hangzhou, China.
14. Milella, A., Maglietta, R., Caccia, M., Bruzzone, G., 2017. Robotic Inspection of Ship Hull Surfaces Using a Magnetic Crawler and a Monocular Camera. *Sens. Rev.*, 37, 425-435.
15. Yoshida, Y., Ma, S., 2010. Design of a Wall-climbing Robot with Passive Suction Cups.

- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Tianjin, 1513-1518.
16. Fischer, W., Caprari, G., Siegart, R., Moser, R., 2012. Compact Climbing Robot Rolling on Flexible Magnetic Rollers for Generator Inspection with the Rotor Still Installed. *Industrial Robot: An International Journal*, 39, 236-241.
  17. Chen, Y., Zhang, J., Liu, H., Chen, Z., 2022. A New PID Tuning Method for DC Motors Based on Fractional Order Integral Criterion. *ISA Transactions*, 123, 211-219.
  18. Kim, J., Kim, D., 2021. Development of a High-Precision Position Control System Using a PID Controller for a Monophasic DC Motor. *Applied Sciences*, 11(10), 4654.
  19. Li, X., Li, Y., Li, Z., Zhang, L., 2022. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Position Tracking of DC Motor with Lead-Lag Compensator, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 20(1), 382-392.
  20. Kim, J., Kim, D., 2022. A Robust Position Control System Using a Lead-Lag Compensator for a Monophasic DC Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 767-777.
  21. Chen, G., Yu, Z., Du, R., 2022. State Feedback Control of a DC Motor Based on Sliding Mode Observer. *Journal of Control and Decision*, 7(2), 220-227.
  22. Han, X., Wang, F., 2021. Design and Implementation of State Space Control for DC Motor Based on System Identification. *Journal of Control and Decision*, 6(3), 307-314.
  23. Yu, Z., Chen, X., Zhang, Y., Chen, W., 2021. Design and Simulation of a Motion Control System for a Quadrotor Based on Fuzzy PID Control. *Aerospace Science and Technology*, 120, 106082.
  24. Huang, Y., He, S., Zhang, W., 2021. Adaptive Sliding Mode Control for the Motion Control of Robot Manipulators with Parameter Uncertainties. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(2), 652-661.
  25. Karakas, B., Arslan, E., Sekercioglu, A., 2021. Neural Network-based Robust Motion Control for a Robotic System with a 3-DOF Planar Parallel Manipulator. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 69, 101992.
  26. Zhang, H., Yu, H., 2022. An Adaptive Fuzzy Control Approach for Motion Control of an Underwater Robot with an Unknown Payload. *Ocean Engineering*, 252, 108851.
  27. Li, Y., Li, J., Dong, W., Li, C., 2022. Robust Motion Control for a Flexible Joint Robot Using Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 101974.
  28. Sira-Ramirez, H., Agrawal, S.K., 2004. *Differential Flat Systems*, 17. CRC Press.
  29. Castillo-Berrio, C., Feliu, V., 2015. Vibration-Free Position Control for a Two-Degrees-of-Freedom Flexible-Beam Sensor. *Mechatronics*, 27.
  30. Nise, N.S., 2015. *Control Systems Engineering*, 7<sup>th</sup> ed. California, John Wiley Sons.
  31. Olsson, H., Åström, K.J., Canudas de Wit, C., Gafvert, M., Lischinsky, P., 1998. Friction Models and Friction Compensation. *European Journal of Control*, 4(3), 176-195.



## ***Foeniculum Vulgare* Ekstraktının Altuzan İlacı Kombinasyonu ile A549 Akciğer Kanseri Hücrelerine Karşı Antikanser Etkileri**

**Kübra KELLEÇİ<sup>1,2</sup> ORCID 0000-0002-9409-2254**

**Eda GÖLEBATMAZ<sup>3</sup> ORCID 0000-0001-6974-5877**

**Murat IHLAMUR<sup>\*1,4</sup> ORCID 0000-0002-0458-5638**

**Emrah Şefik ABAMOR<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-9174-4528**

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya- Metalurji Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul

<sup>2</sup>Beykoz Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikleri Bölümü, İstanbul

<sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, Biyoloji Bölümü, Eskişehir

<sup>4</sup>Biruni Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 02.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: KELLEÇİ, K., GÖLEBATMAZ, E., IHLAMUR, M., ABAMOR, E.Ş., (2024). *Foeniculum Vulgare* Ekstraktının Altuzan İlacı Kombinasyonu ile A549 Akciğer Kanseri Hücrelerine Karşı Antikanser Etkileri. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 189-195.

### **Öz**

Kanser, herhangi bir doku ya da organdaki hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalmaları sonucu oluşan, vücudun diğer bölgelerine metastaz yapma potansiyeli olan bir hastalıktır. Pek çok farklı kanser çeşidi olmakla birlikte akciğer kanseri dünya geneli en yaygın görülen kanser türüdür. Akciğer kanserine karşı günümüzde kemoterapi, radyoterapi, immünoterapi gibi tedavi yöntemleri uygulanmakla birlikte bu yöntemler kanser hücrelerinin yanı sıra sağlıklı hücreleri de etkilemektedir. Mevcut tedavi yöntemlerin dezavantajı nedeniyle yeni tedavi yöntemlerine yönelik araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Son yıllarda üzerine araştırma yapılan tedavi yöntemleri arasında bitki ekstraktlarının kullanıldığı bitkisel terapi teknikleri ön plana çıkmaktadır. *Foeniculum vulgare* (rezene) ekstraktının akciğer kanseri hücrelerinde anti-tümör etkisi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada *Foeniculum vulgare* ve altuzan ilaç kombinasyonlarının A549 akciğer kanseri, RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücre hatlarındaki sitotoksik etkinliği incelenmiştir. Sonuç olarak, *Foeniculum vulgare* ekstraktının A549 akciğer kanseri hücre hattında öldürme etkisinin olduğu fakat bu etkinin düşük olduğu belirlenmiştir. *Foeniculum vulgare* ekstraktı ile altuzan ilacı ile hazırlanan kombinasyon terapi yöntemi ile A549 akciğer kanseri hücrelerinde *Foeniculum vulgare* ekstraktının tek uygulanmasına göre daha yüksek sitotoksik etkiye neden olduğu tarafımızca tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akciğer kanser, A549, *Foeniculum vulgare*, Sitotoksosite, Altuzan

### **Anticancer Effects of *Foeniculum Vulgare* Extract with Altuzan Drug Combination Against A549 Lung Cancer Cells**

#### **Abstract**

Cancer is a disease that occurs as a result of the uncontrolled proliferation of cells in any tissue or organ, with the potential to metastasize to other parts of the body. Although there are many different types of

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Murat IHLAMUR, [ihlamurmurat@gmail.com](mailto:ihlamurmurat@gmail.com)

cancer, lung cancer is the most common type of cancer worldwide. Although treatment methods such as chemotherapy, radiotherapy and immunotherapy are applied against lung cancer, these methods affect healthy cells as well as cancer cells. Due to the disadvantages of existing treatment methods, research on new treatment methods has gained momentum in recent years. Among the treatment methods researched in recent years, herbal therapy techniques using plant extracts have come to the fore. *Foeniculum vulgare* (fennel) extract is known to have an anti-tumor effect on lung cancer cells. In this study, the cytotoxic activity of *Foeniculum vulgare* and altuzan drug combinations in A549 lung cancer, RAW 264.7 and THP-1 macrophage cell lines was investigated. As a result, it was determined that *Foeniculum vulgare* extract had a killing effect on the A549 lung cancer cell line, but this effect was low. We have determined that the combination therapy method prepared with *Foeniculum vulgare* extract and altuzan drug causes a higher cytotoxic effect in A549 lung cancer cells than the single application of *Foeniculum vulgare* extract.

**Keywords:** Lung cancer, A549, *Foeniculum vulgare*, Cytotoxicity, Altuzan

## 1. GİRİŞ

Kanser, herhangi bir doku ya da organdaki hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalması sonucu oluşan, vücudun diğer bölgelerine metastaz yapma potansiyeli olan bir hastalıktır. Yapılan araştırmalar kanserin, tümör baskılayıcı genlerin mutasyona uğraması veya onkogenik mutasyonların birikmesinden kaynaklandığı belirtilmektedir. 200'den fazla kanser türü olmakla birlikte kanserler genel olarak olduğu dokuya göre isimlendirilmektedir [1].

Dünyada en sık görülen ve ölüm nedenleri arasında birinci sırada yer alan kanser çeşidi akciğer kanseridir. Akciğer kanseri dünyada yaygın bir hastalık değil iken değişen ortam şartları ve sigara içme oranının artması ile birlikte kanserin sıklığı giderek artmış ve dünyada en çok görülen kanser türlerinden biri olmuştur. Akciğer kanseri tüm dünyadaki kanserlerin %12.8'ini ve kanser ölümlerinin ise %17.8'ini oluşturmaktadır [2]. Akciğer kanserinin evrelerine ve histopatolojisine göre tedavi yaklaşımı değişmekle birlikte genel olarak cerrahi tedavi, radyoterapi, kemoterapi, hormonoterapi ve immünoterapi gibi farklı tedavi yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bu yöntemlerin avantajı olduğu kadar dezavantajlarının da olması, yeni tedavi yöntemlerinin araştırılmasına neden olmuştur. Bu avantajları arasında genel olarak normal hücrelerin de kullanılan tedaviler ile öldürülmesi gelmektedir. Bundan dolayı bu tedavi yöntemleri dezavantajlı olmaktadır [3]. Son yıllarda bu yöntemlere ek olarak çeşitli bitkilerle akciğer kanseri için

uygulanılabilecek fitoterapi yöntemleri de araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda rezene, kakule, zerdeçal, zencefil gibi bitki ekstraktlarının kanser tedavilerinde kullanılan ilaçların toksik etkilerini azaltmakla birlikte kemoterapötik etkinliklerini artırdığı görülmüştür [4].

*Foeniculum vulgare* tohumları ile yapılan son çalışmalarda *Foeniculum vulgare* ekstraktının antikanser, anti-inflamatuvar, antiproliferatif ve pro-apoptotik etkinliklerinin olduğu belirlenmiştir [5]. *Foeniculum vulgare* ekstraktı ile muamele edilen akciğer kanseri hücreleri ile yapılan çalışmalarda kanserli hücrelerin canlılığının azaldığı belirlenmiştir [6]. Bitki ekstraktı ile mevcut kanser ilaçları kombine edilerek yapılan kanser tedavilerinde daha etkili sonuçlar alındığı bilinmektedir. Aynı zamanda kanser tedavisinde kullanılan bitkilerin, ilaçların toksik etkisini azalttığını ve bu sayede doğal immün sistem hücreleri üzerinde daha az toksik etki gösterdiği bildirilmiştir. Bitki-ilaç kombinasyonu ile oluşturulan tedavi yaklaşımlarının kanser hücrelerinde yüksek sitotoksik etkisinin olduğu belirtilmiştir [7]. Bu çalışmada, rezene tohumu ekstraktının akciğer kanseri ve makrofaj hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkinliği incelenmiştir. Aynı zamanda ilk defa rezene tohumu ekstraktı ile altuzan ilacı kombine edilerek akciğer kanseri ve doğal immün sistem üzerindeki sitotoksik etkilerine bakılmıştır. Elde edilen veriler ışığında rezene tohumu ekstraktının tek başına ve altuzan ilacı ile kombine edilerek akciğer kanseri tedavisinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu çalışma ile

akciğer kanserinde yeni bir kombine bitki-ilaç tedavisi belirlenecektir.

## 2. YÖNTEM

RPMI-1640, DMEM-High Glucose, Fetal bovin serum (FBS), Dimetilsulfoxid (DMSO), gentamisin, filtre kâğıdı (Hoffmann) ve 0.22 µm filtrelerin tümü Sigma-Aldrich'ten satın alındı. Tüm sulu çözeltiler milli-Q su ile hazırlandı. Morfolojik değişiklikleri gözlemlemek amacıyla Ters mikroskop Olympus CKX 41 kullanıldı.

### 2.1. Rezene Tohumu Ekstraktının Elde Edilmesi

Rezene tohumları alınarak havanda ezildi ve ufak hale getirildi. 8 gr rezene tohumunun üzerine 50 ml metanol eklendi ve 6 gün karanlık ortamda oda sıcaklığında inkübasyona bırakıldı. Elde edilen özüt whatman kâğıdı ile süzüldü. Özütte bulunan metanol çeker ocak ve ısıtıcı kullanılarak buharlaştırıldı [8].

### 2.2. Hücre Kültürlerinin Yapılması

Deneylerde kullanılan hücre hatları olan THP-1 insan ve RAW 264.7 fare makrofaj hücre hatları ve A549 insan akciğer kanseri hücre hattı laboratuvarındaki kriyobanktan kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan medyumlar %1'lik penisilin-streptomisin ve L-glutaminin RPMI-1640 ve DMEM-High Glucose (Gibco) medyumuna eklenmesiyle hazırlanmıştır. Kullanılan medyumlara %10 Fetal bovine serum (FBS) (Sigma) eklenerek hücre proliferasyonu artırılmıştır [9]. Deneysel çalışmalarda hücrelerin pasaj sayısı 10-15 arasında değişmektedir.

Hücre hatlarının kültürü %10 FBS içeren DMEM-High Glucose ve RPMI 1640 medyumlarda yapıldı. Hücrelerin inkübasyon ortamı 37°C, %95 nem ve %5 CO<sub>2</sub> içeren etüdüdür. A549 akciğer kanseri ve RAW 264.7 makrofaj hücreleri enzimatik yol, THP-1 insan makrofaj hücreleri ise fiziksel yol ile toplandı. Bu hücrelerin 1000 rpm'de, oda

sıcaklığında, 5 dk santrifüj edilerek çökmesi sağlandı. 96 kuyulu plakalara ekimleri kuyu başına 1x10<sup>5</sup> hücre ml<sup>-1</sup> gelecek şekilde yapıldı. Ekimi yapılan hücreler 24 saat boyunca inkübasyonda tutuldu [10].

### 2.3. Canlılık Analizlerinin Yapılması

Elde edilen *Foeniculum vulgare* ekstraktı (10 µg/ml-100 µg/ml arası), altuzan ilacı (10 µg/ml-100 µg/ml arası) ve *Foeniculum vulgare* ekstraktı-altuzan ilacı (40 µg/ml ekstrakt ve 10 µg/ml-100 µg/ml ilaç) konsantrasyonlarının MTT yöntemi ile sitotoksik etkileri belirlendi. Canlılık analizi, 3-(4,5-Dimetiltiazol-2-il)-2,5-Difeniltetrazolyum Bromür kullanılarak belirlendi. 96 kuyulu plakalara kuyu başı 1x10<sup>5</sup> hücre/ml konsantrasyonunda hücre eklendi ve üzerine *Foeniculum vulgare* ekstraktı, altuzan ilacı ve *Foeniculum vulgare* ekstraktı-altuzan ilacı kombinasyonları uygulandı. Hücreler %5 CO<sub>2</sub>'li 37°C olan etüde 48 saat boyunca tutuldu. İnkübasyon süresi sonunda kuyulara 10 µl MTT (10 mg/ml) solüsyonu ilave edildi. %5 CO<sub>2</sub>'li 37 °C olan etüde 3 saat inkübasyona bırakıldı. Daha sonra kuyulara 100 µl dimetilsülfoksit (DMSO) eklendi. 96'lık plaka oda sıcaklığında ve karanlık ortamda 30 dakika tutuldu [11,12]. 570 nm dalga boyunda hücrelerin canlılık analizleri belirlendi. Bu işlem deney grupları için üç defa tekrarlandı ve alınan değerlerin ortalaması alındı. Deneyde kullanılan grupların canlılık analizi eşitlik 1 kullanılarak belirlendi. Veri grafikleri oluşturuldu.

$$\text{Hücre Canlılığı (\%)} = \left( \frac{\text{Örnek absorbanansı}}{\text{Kontrol absorbanansı}} \right) * 100 \quad (1)$$

### 2.4. İstatistiksel Analiz

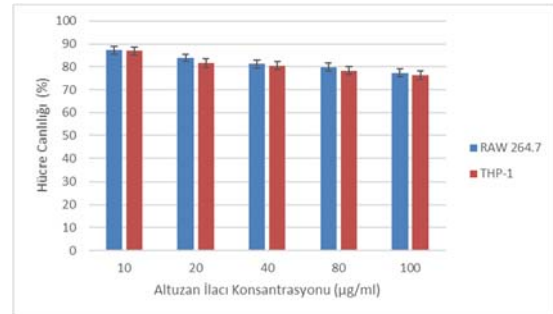
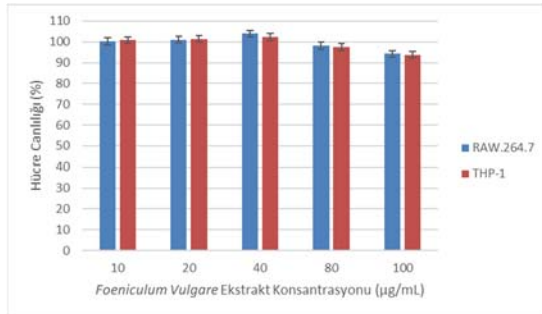
Bu çalışmada elde edilen verilerin analizi IBM SPSS 25.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, ABD) programı kullanılarak yapıldı. Gruplar arası karşılaştırmalar tek yönlü varyans analizi Tek Yönlü ANOVA testi kullanılarak yapılmıştır. Ortalama±standart sapma (Ortalama±SD) olarak

sonuçları verildi. İstatistiksel anlamlılık  $p < 0,05$  olarak kabul edildi.

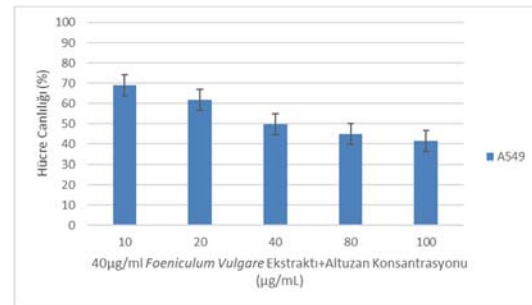
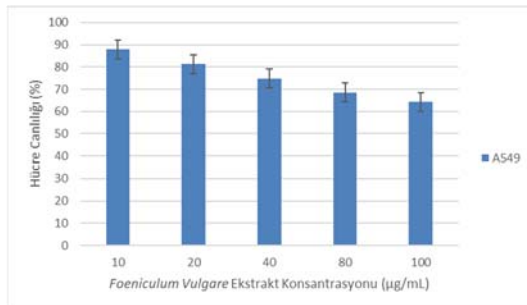
### 3. BULGULAR

Bitkilerde ve bitkisel ürünlerdeki bazı metaboliklerin ve yapısal bileşenlerin (fenolik asitler, flavonoidler, tanenler, kinonlar vb.) kanser tedavilerinde etkili olduğu literatürde belirtilmektedir [13]. Yapılan bu çalışmada *Foeniculum vulgare* tohumu kullanılarak maserasyon yöntemi ile *Foeniculum vulgare* ekstraktı elde edilmiştir. Elde edilen ekstraktın RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkilerine bakılarak akciğer kanseri tedavisinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Elde edilen *Foeniculum vulgare* ekstraktının ve *Foeniculum vulgare* ekstrakt-altuzan ilacı kombinasyonunun A549 akciğer kanseri hücrelerindeki öldürme etkileri de incelenmiştir. Yapılan çalışmada in vivo çalışmalarda kullanılmak üzere akciğer kanseri tedavisinde uygulama

potansiyeli olabilecek *Foeniculum vulgare* ekstrakt-altuzan ilacı formülasyonu belirlenmiştir. *Foeniculum vulgare* ekstraktının RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkilerine bağlı canlılık analizleri Şekil 1’de gösterilmiştir. *Foeniculum vulgare* ekstraktının 100  $\mu\text{g/ml}$  konsantrasyonda öldürme etkinliği en yüksektir. Fakat 100  $\mu\text{g/ml}$  konsantrasyonun RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücrelerine muamelesi sonucunda doğal immün sistem hücreleri üzerinde diğer konsantrasyonlara göre daha yüksek sitotoksik etki göstermektedir. Bundan dolayı bu konsantrasyon değerlendirilmemiştir. *Foeniculum vulgare* ekstraktının 100  $\mu\text{g/ml}$  konsantrasyondan sonra en yüksek RAW 264.7 ve THP-1 hücrelerinde sitotoksik olmayan etkinlik 40  $\mu\text{g/ml}$  konsantrasyonda belirlenmiştir. 40  $\mu\text{g/ml}$  konsantrasyondaki *Foeniculum vulgare* ekstraktının sitotoksik etkisinde RAW 264.7 hücrelerinde %103,95, THP-1 hücrelerinde ise %102,33 canlılık belirlenmiştir ( $p < 0,05$ ).

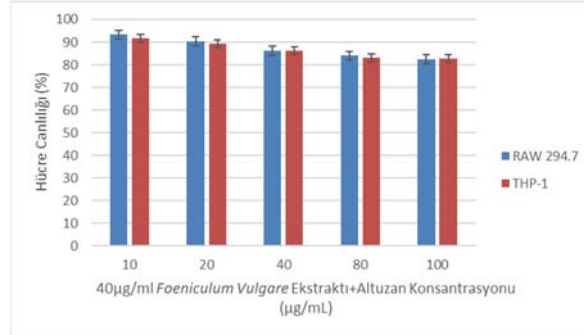


Şekil 1. *Foeniculum vulgare* ekstraktının ve altuzan ilacının RAW 264.7 ve THP-1 hücre hatlarındaki sitotoksik etkisi



Şekil 2. *Foeniculum vulgare* ekstraktı tek başına ve altuzan ilacı kombinasyonu kullanılarak A549 hücre hattındaki sitotoksik etkisi





Şekil 3. *Foeniculum vulgare* ekstraktı ve altuzan ilacı kombinasyonunun RAW 264.7 ve THP-1 hücre hatlarındaki sitotoksik etkisi

Altuzan ilacının RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkilerine bağlı olarak canlılık analizleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Çalışmada altuzan ilacının 100 µg/ml konsantrasyonda öldürme etkinliği en yüksektir. 100 µg/ml konsantrasyondaki altuzan ilacının sitotoksik etkisinde RAW 264.7 hücrelerinde %77,36, THP-1 hücrelerinde ise %76,27 canlılık belirlenmiştir ( $p<0.05$ ). *Foeniculum vulgare* ekstraktında bulunan fitokimyasalların akciğer kanseri hücreleri üzerinde sitotoksik etkisinin olduğu bilinmektedir [6]. *Foeniculum vulgare* ekstraktının A549 akciğer kanseri hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkilerine bağlı olarak canlılık analizleri Şekil 2'de gösterilmiştir. 40 µg/ml konsantrasyondaki *Foeniculum vulgare* ekstraktının sitotoksik etkisinde A549 akciğer kanseri hücrelerinde %74,82 canlılık belirlenmiştir ( $p<0.05$ ). Akciğer kanseri tedavisinde birçok ilaç kullanılmaktadır. Bu ilaçların bazıları akciğer kanseri tedavisinde etkili sonuçlar da vermektedir [14]. Fakat kullanılan ilaçların sitotoksik etkilerinin yüksek olması ve etkinlik düzeylerinin istenilen seviyelerde olmamasından dolayı son yıllarda kanser ilaçları, bitkisel ekstraktlarla kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan bu kombinasyonlar ile kanser ilaçlarının toksisitesinin azaltılması ve terapötik etkilerinin artırılması amaçlanmaktadır [15]. Yapılan çalışmada *Foeniculum vulgare* ekstraktının altuzan ilacı ile kombinasyonunun A549 akciğer kanseri hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkilerine bağlı olarak canlılık analizi Şekil 2'de gösterilmiştir. 40 µg/ml *Foeniculum vulgare* ekstraktı-100 µg/ml altuzan ilacının ilacının sitotoksik etkisinde A549 hücrelerinde %41,37

canlılık tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ). *Foeniculum vulgare* ekstraktının altuzan ilacı ile kombinasyonunun RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkilerine bağlı olarak canlılık analizleri Şekil 3'te gösterilmiştir. 40 µg/ml *Foeniculum vulgare* ekstraktı-100 µg/ml altuzan ilacının sitotoksik etkisinde RAW 264.7 hücrelerinde %82,41, THP-1 hücrelerinde ise %82,64 canlılık gözlenmiştir ( $p<0.05$ ).

#### 4. TARTIŞMA

Kanser hastalığı tüm dünya için küresel bir sorun haline gelmektedir. Kanser hastalığının önlenmesi için birçok tedavi yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında kemoterapi, radyoterapi ve immünoterapi en sık kullanılan tedavi yöntemlerindedir. Kullanılan bu yöntemler kanser hücreleri üzerinde etkili olmakla birlikte sağlıklı hücreler üzerinde de öldürme etkileri mevcuttur. Bundan dolayı kanser tedavilerinde yeni tedavi yaklaşımları geliştirilmeye çalışılmaktadır [16]. Günümüzde kanser tedavilerinde tamamlayıcı tıp ya da alternatif tıp yöntemleri popülerlik kazanmıştır. Rezene, kakule, kurkimin gibi bitkilerden elde edilen ekstraktların bulundurduğu metabolikler, flavonoidler, kinonlar gibi bileşikler sayesinde kanser tedavilerinde bu bitkisel yaklaşımlar olumlu sonuçlar vermektedir [17]. Yapılan çalışmalarda bitkisel ajanlar ile kanser ajanları da kanser tedavilerinde birlikte kullanılmıştır. Bu kombine tedavi yaklaşımlarında bitkisel ajanların antikanser ajanlarının tedavi etkinliklerini artırdığı ve ayrıca toksik etkilerini de azalttığı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada, *Foeniculum vulgare* ekstraktı maserasyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen *Foeniculum vulgare* ekstraktının makrofaj ve akciğer kanseri hücreleri üzerindeki sitotoksik etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada *Foeniculum vulgare* ekstraktının RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücreleri üzerinde sitotoksik etkilerinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca *Foeniculum vulgare* ekstraktı 10 µg/ml, 20 µg/ml, 40 µg/ml konsantrasyonlarda RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücrelerine uygulandığında hücre canlılığını artırdığı gözlenmiştir. 100 µg/ml ve 80 µg/ml konsantrasyonda ise *Foeniculum vulgare* ekstraktının az de olsa toksik etki oluşturduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sitotoksik verileri sonucunda RAW 264.7 ve THP-1 makrofaj hücrelerine uygulanan *Foeniculum vulgare* ekstraktı konsantrasyonlarında en uygun konsantrasyonun 40µg/ml olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada 40 µg/ml *Foeniculum vulgare* ekstraktı konsantrasyonu A549 akciğer kanseri hücre hattına uygulandığında düşük oranda öldürme etkisine sahiptir. Bundan dolayı yapılan çalışmada *Foeniculum vulgare* ekstraktı akciğer kanseri tedavilerinde kullanılan altuzan ilacı kombinasyonu ile uygulanarak akciğer kanseri hücrelerinin ölüm oranını arttırmak istenmiştir.

*Foeniculum vulgare* ekstraktı altuzan ilacı ile kombine edildiğinde ekstraktın tek başına kullanımına göre öldürme etkisinin arttığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada *Foeniculum vulgare* ekstraktının altuzan ilacı kombinasyonunu ile kullanıldığında A549 akciğer kanseri hücre hattında sitotoksik etkisi en yüksek 40 µg/ml *Foeniculum vulgare* ekstraktı-100 µg/ml altuzan konsantrasyonunda gösterdiği belirlenmiştir. Bu konsantrasyon A549 akciğer kanseri hücrelerine uygulandığında %41,37 canlılık belirlenmiştir. Canlılığın düşük olmasının nedeni, *Foeniculum vulgare* ekstraktındaki moleküllerin kanserde bulunan iletişim yollarını inhibe ederek hücreyi ölüme götürmesi ve altuzan ilacının akciğer kanseri hücrelerinin çoğalmasını ve proliferasyonu baskılaması olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak *Foeniculum vulgare* tohumundan elde edilen ekstraktın 10 µg/ml, 20 µg/ml, 40 µg/ml konsantrasyonlarda RAW 264.7 ve THP-1

makrofaj hücre hatlarında toksisitelerinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca *Foeniculum vulgare* ekstraktının bu konsantrasyonlarda A549 akciğer kanseri hücre hattında öldürme etkisinin olduğu görülmüştür. Fakat bu konsantrasyonlarda akciğer kanseri hücreleri için öldürme etkisinin düşük olduğundan akciğer kanseri tedavilerinde kullanılan altuzan ilacı kombine edilere A549 akciğer kanseri hücrelerinde *Foeniculum vulgare* ekstrakt-altuzan ilacı kombinasyonu kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda antikanser özellikte olan ve toksik etki göstermeyen *Foeniculum vulgare* ekstraktının tek başına kullanıldığında akciğer kanseri hücreleri üzerinde yüksek derecede öldürme etkisi göstermese de altuzan ilacı ile birlikte kullanıldığında yüksek öldürme etkilerinin olduğu gözlenmiştir.

## 5. SONUÇ

Akciğer kanseri günümüzde en tehlikeli kanser türlerinden biridir. Akciğer kanserine karşı kullanılan tedaviler yetersiz olduğundan dolayı yeni tedavi yaklaşımları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmalardan biri de fitoterapi yaklaşımlarıdır. Bazı bitkiler kanserlerde etkili olmaktadır. Yapılan çalışmada ise rezene tohumunun akciğer kanserindeki etkinliği tek başına ve altuzan ilacı kombinasyonu ile birlikte incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında akciğer kanseri tedavisinde kullanılmak üzere *Foeniculum vulgare* ekstraktı tek başına sitotoksik etki gösterebilmekte ve aynı zamanda bitki-altuzan ilacı kombinasyonunun yüksek etkinlik gösterebileceği ve in vivo çalışmalarda kullanılarak akciğer kanseri tedavilerinde yeni bir ilaç formülasyonu olarak kullanımının gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Baudino, T.A., 2015. Targeted Cancer Therapy: The Next Generation of Cancer Treatment. *Current Drug Discovery Technologies*, 12(1), 3-20.
2. Thandra, K.C., Barsouk, A., Saginala, K., Aluru, J.S., Barsouk, A., 2021. Epidemiology of Lung Cancer. *Contemp Oncol*, 25(1), 45-52.

3. Smyth, E.C., Nilsson, M., Grabsch, H.I., van Grieken, N.C., Lordick, F., 2020. Gastric Cancer. *Lancet*, 396(10251), 635-648.
4. Goyal, S., Gupta, N., Chatterjee, S., Nimesh, S., 2017. Natural Plant Extracts as Potential Therapeutic Agents for the Treatment of Cancer. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 17(2), 96-106.
5. Ke, W., Wang, H., Zhao, X., Lu, Z., 2021. Foeniculum Vulgare Seed Extract Exerts Anti-Cancer Effects on Hepatocellular Carcinoma. *Food Funct*, 12(4), 1482-1497.
6. Ke, W., Zhao, X., Lu, Z., 2021. Foeniculum Vulgare Seed Extract Induces Apoptosis in Lung Cancer Cells Partly Through The Down-Regulation of Bcl-2. *Biomed Pharmacother*, 135, 111213.
7. Cheon, C., 2021. Synergistic Effects of Herbal Medicines and Anticancer Drugs: A Protocol for Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine*, 100(46), e27918.
8. Zhang, Q.W., Lin, L.G., Ye, W.C., 2018. Techniques for Extraction and Isolation of Natural Products: a Comprehensive Review. *Chinese Medical*, 13, 20.
9. Ihlamur, M., Akgül, B., Abamor, E.S., 2022. Farklı Hücre Hatlarında Besiyeri ve FBS'in Hücre Proliferasyonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 17, 55-64.
10. Ihlamur, M., Başarı, H., Zengin Y., Abamor, E.S. 2022. Evaluation of Immunostimulant/ Cytotoxic Activity of Human Breast Cancer Prepared by Different Antigen Preparation Methods With Adjuvants Combination. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 17, 96-110.
11. Ihlamur, M., Hamurci, Y., Kelleci, K., 2022. Mide Kanserine Yönelik AGS Hücrelerinden Geliştirilen Aşı Formülasyonunun İmmünostimulan Etkilerinin Değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 736-748.
12. Hamurci, Y., Ihlamur, M., Abamor, E.S., 2024. Mide Kanserine Karşı Geliştirilen Aşı Formülasyonunun İmmünostimulan ve Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi. *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1), 293-304.
13. Cragg, G.M., Pezzuto, J.M., 2016. Natural Products as a Vital Source for the Discovery of Cancer Chemotherapeutic and Chemopreventive Agents. *Medical Principles and Practice: International Journal of the Kuwait University, Health Science Centre*, 25(2), 41-59.
14. Minguet, J., Smith, K.H., Bramlage, P., 2016. Targeted Therapies for Treatment of Non-Small Cell Lung Cancer--Recent Advances and Future Perspectives. *Int J Cancer*, 138(11), 49-61.
15. Greenwell, M., Rahman, P.K., 2015. Medicinal Plants: Their Use in Anticancer Treatment. *Int J Pharm Sci Res.*, 6(10), 4103-4112.
16. Zengin, Y., Ihlamur, M., Başarı, H., 2022. Immunostimulant/Cytotoxic Effect of Cardamom Extract with Adjuvant Combination on Breast Cancer Cell Line. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 229-234.
17. Hamurci, Y., Ihlamur, M., Zengin, Y., 2022. Elettaria Cardamomum Ekstraktının Proleukin İlacı Kombinasyonu ile Mide Kanseri Hücre Hattı Üzerindeki İmmünostimulan/Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 283-294.



## Evrişimli Sinir Ağı (ESA) Mimarileri ile Hücre Görüntülerinden Sıtmanın Tespit Edilmesi

Yıldırım ÖZÜPAK\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-8461-8702

<sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Diyarbakır

Geliş tarihi: 12.11.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ÖZÜPAK, Y., (2024). Evrişimli Sinir Ağı (ESA) Mimarileri ile Hücre Görüntülerinden Sıtmanın Tespit Edilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 197-210.

### Öz

Sıtma, dünyanın birçok bölgesinde yaygın olarak görülen enfekte sivrisineklerin ısırıkları yoluyla insanlara bulaşan parazitlerin neden olduğu hayati tehdit eden bir hastalıktır. Plasmodium adlı kan paraziti bu hastalığa sebep olmaktadır. Sıtmanın erken teşhisi ve tedavisi, özellikle hastalığın yaygın olduğu gelişmekte olan ülkelerde, hastalık ve ölüm oranlarının azaltılması açısından çok önemlidir. Sıtma teşhisinde kullanılan klasik yöntem, uzmanlar tarafından kırmızı kan hücrelerinin mikroskop yardımıyla incelenmesiyle tespitidir. Bu yöntem, sadece uzmanın bilgi ve deneyimine dayandığı için verimsizdir. Günümüzde hastalığın yüksek oranda doğru bir şekilde tespiti için makine öğrenmesi yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, hücreyi parazitli veya parazitsiz olarak tespit için Evrişimli Sinir Ağı (ESA) mimarisi önerilmiştir. Önerilen ESA mimarisine ek olarak VGG-19, InceptionResNetV2, DenseNet121 ve EfficientNetB3 gibi önceden eğitilmiş ESA mimarilerinin performansları ile önerdiğimiz modelin performansı karşılaştırılmıştır. Önerdiğimiz ESA mimarisinde National Institute of Health (NIH) tarafından yayınlanan Sıtma Veri Kümesi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Mimarimiz %98,9 doğruluk ile çalışmaktadır. Çalışmanın sonuçları, Plasmodium içeren hücre görüntülerinin doğruluğunu artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıtma, ESA, Önceden eğitilmiş model, Hastalık tespiti

### Detection of Malaria with Convolutional Neural Network (CNN) Architectures Using Cell Images

#### Abstract

This article highlights that malaria is widespread worldwide through infected mosquitoes transmitted to humans and is caused by the blood parasite Plasmodium. Early diagnosis and treatment of malaria plays an important role in reducing morbidity and mortality, especially in developing countries. The traditional method of diagnosing malaria involves examining red blood cells under a microscope, but this method can be inefficient as it relies on expert knowledge. A highlight of the paper is the use of machine learning methods in malaria diagnosis. In particular, a Convolutional Neural Network (CNN) architecture is

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Yıldırım ÖZÜPAK, [yildirimosupak@gmail.com](mailto:yildirimosupak@gmail.com)

proposed to detect parasitized and non-parasitized cells. Furthermore, the performance of this proposed model is compared with pre-trained CNN architectures such as VGG-19, InceptionResNetV2, DenseNet121 and EfficientNetB3. In the experiments, the Malaria Dataset published by the National Institute of Health (NIH) was used and the proposed CNN architecture achieved 98.9% accuracy. These results show that the proposed model is effective in accurately recognizing cell images containing Plasmodium. This study highlights the potential of AI-based methods in the field of malaria diagnosis.

**Keywords:** Malaria, CNN, Pre-trained model, Disease detection

## 1. GİRİŞ

Doğu Sıtma, dünya çapında hala sağlık sistemlerini tehdit eden ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde milyonlarca insanı etkileyen bir hastalıktır. Hastalık enfekte olmuş sivrisineklerin ısırması yoluyla bulaşan Plasmodium parazitlerden kaynaklanmaktadır. Plasmodium'un en az 150 türü bilinmesine rağmen bunlardan yalnızca birkaçı insanları enfekte edebilir. Plasmodium parazitlerinin neden olduğu bu hastalık, zamanında tedavi edilmezse çocuklar başta olmak üzere birçok insanın ölümüne neden olabilmektedir [1-3]. Tüm sıtma vakalarının yaklaşık %95'i ve sıtmaya bağlı ölümlerin %96'ü Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) 2021 yılı verilerine göre Afrika Bölgesi'nde meydana gelmektedir. Sıtmadan en çok etkilenenler ise beş yaşın altındaki çocuklardır. Sıtmanın tanısı ve tedavisi, hastalığın yayılmasını kontrol etmek ve insan hayatını kurtarmak için hayati öneme sahiptir [1,4].

Geleneksel sıtma tanı yöntemleri, mikroskopik inceleme ve laboratuvar testleri gibi emek yoğun ve maliyetli süreçleri içermektedir. Sıtma hastalığının klinik belirtileri genellikle belirsizdir, bu nedenle hastalığın ciddiyetini anlamak ve önlemek için erken tanı testleri ve tedavi önem arz etmektedir. Sıtma tedavisindeki zorluklar, uzmanlık eksikliği ve sınırlı sayıda araştırmacı bilim insanının bulunması gibi faktörlere dayanmaktadır [5,6]. Sıtma hastalığının erken teşhisi, hastalığın neden olduğu ölümleri kontrol etmek adına kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bilgisayar destekli sistemler, yapay zeka, açık kaynaklı araçlar ve teknikler, sıtmanın tespiti ve değerlendirilmesi için uzmanlar arasında önemli bir yardımcı araç haline gelmiştir. Bu ilerlemeler, sıtma hastalığıyla mücadelede daha etkili ve erişilebilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. [7]. Özellikle son

yıllarda Derin Öğrenme (DL) ve Makine Öğrenme (ML) teknikleri, sıtma tanısı alanında büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu teknolojiler, büyük veri kümelerini işleme, karmaşık desenleri tanıma ve hızlı bir şekilde tanı koyma yetenekleri sayesinde sıtma tanısı için büyük imkân sağlamaktadırlar [8,9]. Tespit ve teşhis araçları doktorlara değerli bir ikinci görüş sunmakta ve tarama sürecinde onlara yardımcı olmaktadır [10]. Tıbbi görüntüleme Bilgisayar Destekli Tespit (CAD) ve teşhis, son on yılda büyük ilgi gören bir araştırma alanı olmuştur. Bu sistemler, büyük veri kümesinde Plasmodium parazitlerini tanımak amacıyla eğitildikleri için insan hatalarını en aza indirebilirler ve sonuçları daha hızlı bir şekilde üretebilirler [11].

Patologlar, teşhis süresini azaltan otomatik bir teşhis yönteminden ikinci bir görüş alabilirler. Tıbbi veriler makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak analiz edilebilir. ML yöntemleri, sıtma semptomları açısından nüfusu izlemek için kullanılabilir. Bir katmanlama sistemindeki doğrusal olmayan işlem birimi seviyelerini içeren DL modelleri, ham verilerdeki yapıları ortaya çıkarmak için kullanılabilir. Öğrenme söz konusu olduğunda, dinamik ve doğrusal olmayan karar verme süreçleri, düşük seviyeli bileşenlerden sofistike özelliklerin kullanılmasını gerektirir [12].

Tıbbi görüntüleme alanında CAD için literatürde çeşitli Yapay Zekâ (AI) yöntemleri önerilmiştir. Yapay Zekâ atılımları, örnekleri insan gözünden daha hızlı ve doğru bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılmıştır. ML ve DL teknikleri tıbbi görüntü kategorizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıbbi cihazlar DL yöntemlerini benimsemeye başlamıştır [13,14]. Kan hücrelerindeki sıtma parazitleri mikroskop görüntüleri ve benzer DL yöntemleri kullanılarak tespit edilmektedir. Bu görüntüler tipik olarak ince

veya kalın kan yaymalarının görüntü grafikleri kullanılarak oluşturulur. Sonuç olarak, kırmızı kan hücrelerinin yoğun tabakası nedeniyle geniş noktaların parazitlerle istila edilme olasılığı daha yüksektir. Bu nedenle, kalın yayma teknikleri kan hücrelerindeki sıtma parazitlerini daha doğru bir şekilde tespit edebilir. Çok ince oldukları için yaymalarda ince bir kan tabakası görülebilir. Doktorlar bu yöntemleri genellikle sıtmanın çeşitli evrelerini ayırt etmek için kullanırlar. Her iki yöntem de yaymaların kalitesine ve kanseri doğru bir şekilde teşhis etmek için insan becerisinin seviyesine dayanır. Ancak DL tabanlı algoritmalar, hem ince hem de kalın yaymaların sıtmayı tanımlamak için verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [15,16]. CNN'in her katmanı için bir görüntüye belirli bir aktivasyon fonksiyonu uygulanır. Bir görüntünün lekeler, kenarlar ve renkler gibi temel özellikleri CNN'in ilk katmanından çıkarılır ve derin iç katmanlar tarafından üst düzey özelliklere dönüştürülür [17]. DL modellerini klinik karar verme sürecine dahil etmek için dünya çapında birçok araştırma projesi sunulmuştur. Son yıllarda, DL algoritmalarının sağlık sektöründe uygulanmasında bir genişleme olmuştur. Sıtma teşhisi için CNN kullanan ilk çalışmalardan biri Liang ve arkadaşlarına aittir [18]. İnce kan yayma görüntü hücrelerini elde etmek için geleneksel optik mikroskop lamları kullanılmış, ardından benzersiz bir CNN modeli kullanılarak sınıflandırılmıştır. Daha "geleneksel" transfer modellerinden daha iyi performans göstermişlerdir (%97,37 doğruluk). Quan ve diğerleri tarafından geliştirilen CNN tabanlı model, yoğun ve artık ağlardan gelen ilkeleri ve dikkati yönlendirme mekanizmalarını içermektedir. Önerilen yöntem bir Dikkatli Yoğun Dairesel Ağ (ACDN) idi. Sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. DenseNet121 ve DPN92 sırasıyla %90,94 ve %87,88 sonuç veririrken, bu algoritma %97,47'lik üstün bir performans elde etmiştir. Hassasiyet ve yakınsama ACDN modelinin güçlü noktalarıdır [19]. Rajaraman ve arkadaşları, sınıflandırma için özellik çıkarıcı olarak önceden eğitilmiş CNN tabanlı DL algoritmalarını kullanmışlardır. Algoritmalar ne kadar iyi çalıştıklarını görmek için test edilmiştir. Altı farklı mimariye kadar bu modeller temel alınmış ve özel modeller olarak kullanılmıştır. Kesinlik %91 ila %95 arasında doğru

çıktı. ResNet ve VGG16 rakiplerinden daha iyi performans gösterdi. Zaten eğitilmiş olan CNN'leri kullanmanın özellikleri keşfetmek için harika bir yol olduğuna inanıyorlar [20].

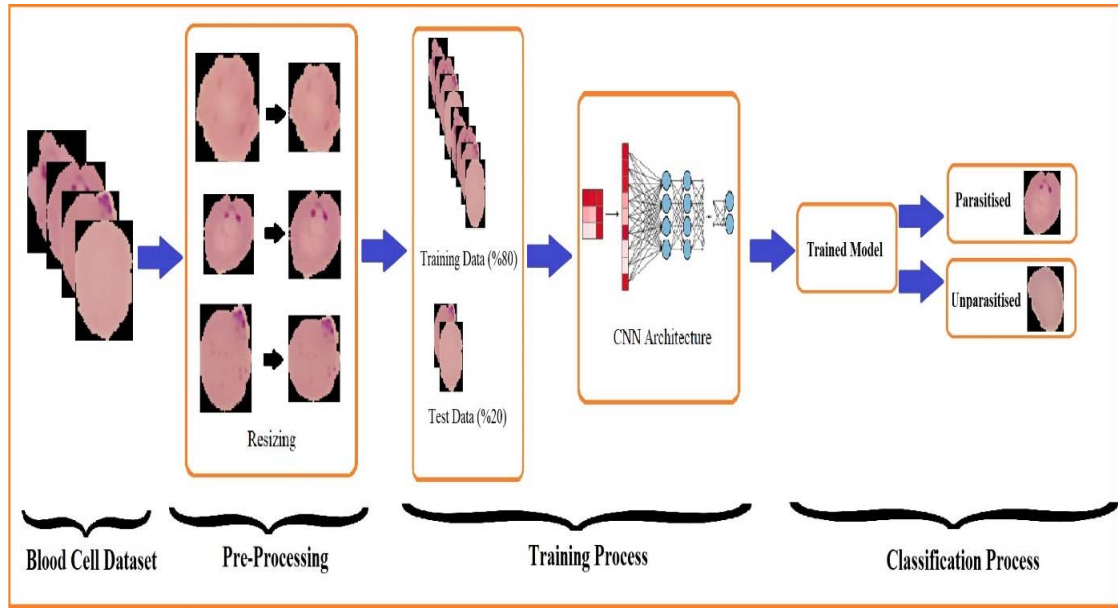
Mikroskobik görüntüler kullanılarak farklı sınıflardaki sıtma parazitlerinin tespiti ve sınıflandırılması için yapay zeka tabanlı yaklaşımlar üzerine incelemeler yapılmıştır [21]. Tasarlanan ViT modeli ile %93,97 doğrulama doğruluğu ve %90,03 test doğruluğu ile iyi performans elde edilmiştir. Performansın daha iyi değerlendirilmesi için farklı derin öğrenme ağları ile karşılaştırılmıştır [22]. Derin öğrenme kullanılarak sıtma hastalığının tespiti ve analizi için derin öğrenmeli evrişimli sinir ağları modeli kullanılarak %95,23 doğruluk oranına sahip sonuçlar elde edilmiştir. Bu modelde rastgele seçilen 16 görüntüden 15'inin doğru tahmin edildiği ifade edilmiştir [23]. Nesne algılama modelleri kullanılarak sıtmanın sınıflandırılması üzerine yapılan bir çalışmada ölçeklendirilmiş YOLOv4 %83'lük doğruluk oranıyla ilk sırada yer alırken, onu %78,5'lik doğruluk oranıyla YOLOv5 takip etmiştir [24]. Derin öğrenme algoritmalarına dayalı sıtma paraziti tespiti (CNNs) tekniği üzerine çalışmalar yapılmıştır [25].

Bu çalışma, geleneksel sıtma tanı yöntemlerinin ötesine geçerek, derin öğrenme ve makine öğrenme model mimarilerinin performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu teknolojilerin klinik uygulamalarda nasıl kullanılacağı ve sıtma tanısının doğruluğunu artırabileceği konusunda derinlemesine bir inceleme sunulmuştur. Veri setinin eğitilmesi sonucunda aldığımız sonuçlar doğrultusunda hücre görüntüsünün tahminini yapan bir uygulama geliştirilmiştir. Sonuç olarak, sıtma tanısı alanında önemli bir dönüşümün başlangıcını işaret edebilir ve hastalığın erken teşhis edilmesi ve kontrol altına alınmasına büyük katkılar sağlayabilir. Bu makalenin amacı, giriş görüntülerinden gerçek zamanlı sıtma tespitinde etkili ve doğru bir şekilde yararlı olabilecek evrişimli sinir ağı (CNN) gibi derin öğrenme mimarisinin nasıl kullanılacağına göstermek ve bir yazılım uygulaması ile uzmanlara teşhis konusunda yardımcı olmaktır.

Çalışmanın diğer bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de çalışmaya konu olan veri seti ve kullanılan yöntemler verilmiştir. Bölüm 3’de ise elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Bölüm 4’de ise sonuç ifadelerine yer verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Bu çalışmada, 2 sınıfa ayrılan sıtma hastalığının sınıflandırılması için evrşimli sinir ağlarına dayalı bir model önerilmiştir. Önerilen modelin blok şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Önerilen sistemin blok diyagramı

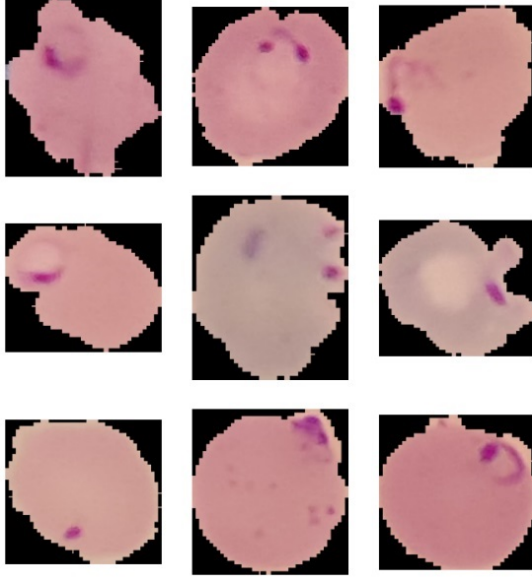
Önerilen yöntemin doğrulanması amacıyla kullanılan görüntüler, Amerika Birleşik Devletleri'nde Ulusal Sağlık Enstitüleri (NIH) tarafından sağlanan açık erişimli bir veri kümesinden temin edilmiştir. Bu veri kümesi, toplamda 27.558 hücre görüntüsü içermekte olup, parazitli ve parazitsiz hücrelerin eşit örneklerini içermektedir [13]. Tüm görseller, Mahidol-Oxford Tropikal Tıp Araştırma Birimi'nde bir uzman tarafından açıklanmıştır. Veri kümesini eğitim için

%80 ve her bir sınıfa ait test örnekleri için %20 olmak üzere rastgele bölünmüştür. Ayrıca (rastgele seçilen) eğitim veri kümesini eğitim ve doğrulama amaçları için sırasıyla %90 ve %20'lük gruplara ayrılmıştır. Çizelge 1’de eğitim, doğrulama ve test için her bir sınıfa ait görüntülerin dağılımı gösterilmektedir. Veri setinden rastgele alınmış parazitli hücre örnekleri Şekil 2’de parazitsiz hücre örnek görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir.

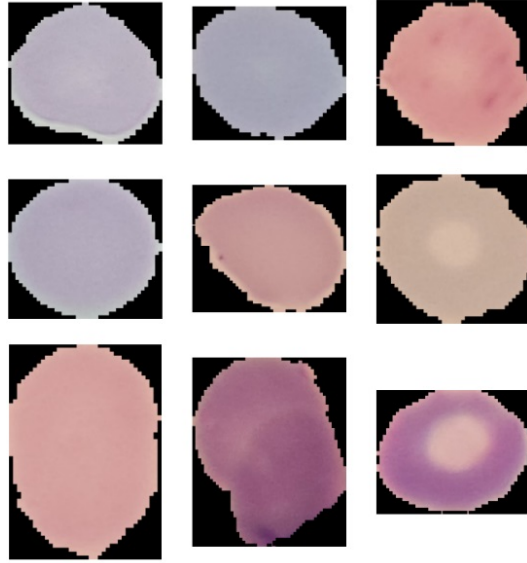
Şekil 1. Önerilen sistemin blok diyagramı

Dataset type	Number of parasitised sample	Number of unparasitised sample	Total
Training Data	8818	8818	17636
Validation Data	2205	2205	4410
Test Data	2756	2756	5512
Total Data			27558





Şekil 2. Parazitli hücre örnekleri

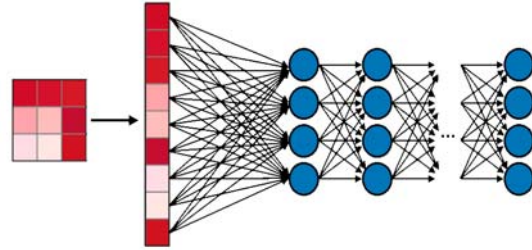


Şekil 3. Parazitsiz hücre örnekleri

## 2.1. Evrişimsel Sinir Ağları

Evrişimli Sinir Ağları (CNN), bilgisayarlı görüş ve desen tanıma alanlarında kullanılan derin öğrenme modellerinden biridir. Temelde, görsel veriler üzerinde etkili bir şekilde çalışabilen özel bir sinir ağı mimarisidir. CNN'ler, bir görüntüyü küçük,

örtüşen bölgelere bölen ve bu bölgelerdeki özellikleri öğrenen bir dizi evrişim katmanından oluşur. Bu özellikler, girdi görüntülerdeki belirli desenleri temsil eder. Evrişim ve havuzlama katmanları, özellik haritalarını oluşturur ve boyutunu azaltır. Bu sayede, ağ, öğrenme sürecinde daha az parametre kullanarak daha karmaşık özellikleri öğrenebilir. CNN'ler genellikle nesne tanıma, yüz tanıma ve diğer görsel görevlerde başarıyla kullanılır. Şekil 4'te evrişimli sinir ağı mimarisi verilmiştir.



Şekil 4. Evrişimli Sinir Ağı Mimarisi

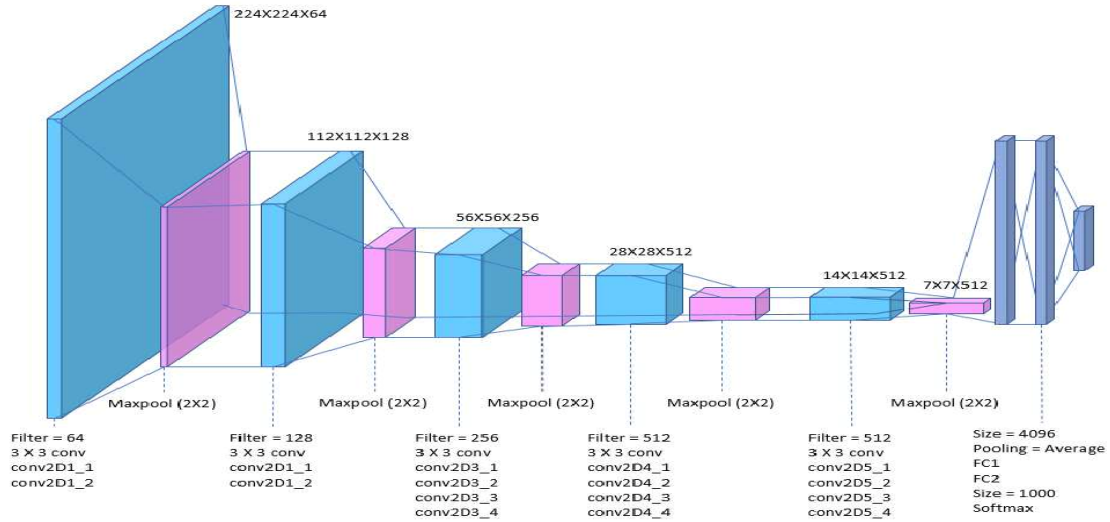
### 2.1.1. VGG19

Visual Geometry Group (VGG) tarafından geliştirilen VGG19, derin öğrenme alanındaki evrişimli sinir ağı (CNN) modelleri arasında önemli bir konuma sahiptir. Bu model, 2014 yılında düzenlenen ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge'da etkileyici bir performans sergileyerek geniş çapta tanınmıştır.

VGG19, toplamda 19 katmandan oluşan derin bir mimariye sahiptir. Mimarinin temel özellikleri, ardışık evrişim katmanları ve ardından gelen havuzlama katmanlarından oluşan tekrarlanan bir yapıdır. Özellikle 3x3 filtre boyutlarına sahip evrişim katmanları, küçük boyutlu filtrelerin ardışık kullanımı sayesinde daha karmaşık özellikleri öğrenme yeteneğini artırır. VGG19 modeli, tam bağlantılı katmanlarla sonlanan bir yapıya sahiptir ki bu katmanlar, öğrenilen özellikleri sınıflandırma görevlerinde kullanır. Ayrıca, VGG19'da genellikle ReLU aktivasyon fonksiyonları tercih edilmiştir. Bu model, derin öğrenme topluluğunda başlangıçta kullanılan ve referans alınan modellerden biri olmuştur. Ancak, büyük parametre sayısı ve hesaplama yoğunluğu nedeniyle günümüzde daha

hafif ve ölçeklenebilir modellerin popülerliği artmış olsa da, VGG19 derin öğrenme mimarilerinin

evriminde kritik bir rol oynamıştır [26]. Şekil 5'te VGG19 mimarisinin görseli verilmiştir.



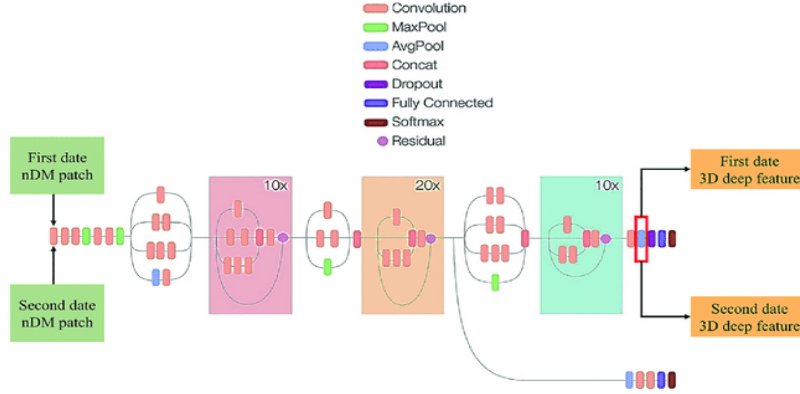
Şekil 5. VGG19 mimarisi

VGG19, toplamda 19 katmandan oluşan derin bir mimariye sahiptir. Mimarinin temel özellikleri, ardışık evrişim katmanları ve ardından gelen havuzlama katmanlarından oluşan tekrarlanan bir yapıdır. Özellikle 3x3 filtre boyutlarına sahip evrişim katmanları, küçük boyutlu filtrelerin ardışık kullanımı sayesinde daha karmaşık özellikleri öğrenme yeteneğini artırır. VGG19 modeli, tam bağlantılı katmanlarla sonlanan bir yapıya sahiptir ki bu katmanlar, öğrenilen özellikleri sınıflandırma görevlerinde kullanır. Ayrıca, VGG19'da genellikle ReLU aktivasyon fonksiyonları tercih edilmiştir. Bu model, derin öğrenme topluluğunda başlangıçta kullanılan ve referans alınan modellerden biri olmuştur. Ancak, büyük parametre sayısı ve hesaplama yoğunluğu nedeniyle günümüzde daha hafif ve ölçeklenebilir modellerin popülerliği artmış olsa da, VGG19 derin öğrenme mimarilerinin evriminde kritik bir rol oynamıştır [26]. Şekil 5'te VGG19 mimarisinin görseli verilmiştir.

### 2.1.2. InceptionResNetV2

InceptionResNetV2, bilgisayarlı görüş ve derin öğrenme alanında kullanılan gelişmiş bir sinir ağı

modelidir. Google tarafından geliştirilen bu mimari, Inception ve ResNet mimarilerini başarıyla birleştirerek daha etkili ve derin öğrenme yetenekleri sunar. Inception, çok çeşitli paralel evrişim yapılarını içeren bir mimariye sahiptir, bu da farklı ölçeklerdeki özellikleri daha etkili bir şekilde çıkarabilmesini sağlar. ResNet, ağız derinliğini artırmak ve eğitim sırasında kaybolan bilgiyi geri iletmek amacıyla residual blokları kullanır. InceptionResNetV2, bu iki yaklaşımı birleştirir ve hem yatay hem de dikey olarak zengin bir bağlantı ağı kurar. Ayrıca, toplu normalizasyon, ReLU aktivasyon fonksiyonları gibi tekniklerle ağız eğitimini daha stabil hale getirir. InceptionResNetV2, ImageNet veri kümesinde ve diğer görevlerde olağanüstü performans sergileyerek, karmaşık görsel tanıma ve sınıflandırma görevlerinde etkili bir şekilde kullanılacak bir model olarak kabul edilmektedir. Bu model, özellikle derin öğrenme topluluğunda, büyük ve çeşitli veri setlerinde başarılı sonuçlar elde etmek amacıyla tercih edilmektedir [27]. Şekil 6'da InceptionResNetV2 mimarisi sunulmuştur.



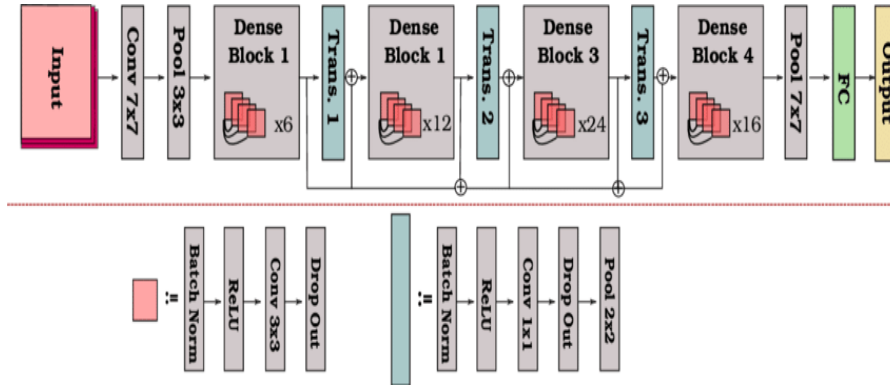
Şekil 6. InceptionResNetV2 mimarisini

### 2.1.3 DenseNet121

DenseNet121, yoğun blokların kullanıldığı ve bilgisayarlı görüş alanındaki derin öğrenme görevlerinde etkili bir performans sergileyen bir sinir ağı modelidir. Bu model, yoğun bağlantılar ile

öne çıkan bir mimariye sahiptir, yani her katman önceki katmanlarla direkt olarak bağlantılıdır. Bu bağlantılar, ağır öğrenme kapasitesini artırır ve ağır daha etkili bir şekilde bilgi paylaşmasına olanak tanır. DenseNet121, toplamda 121 katmandan oluşan bir derin ağ yapısına sahiptir. Yoğun

bağlantıların yanı sıra, her yoğun blok içinde evrişim katmanları ve havuzlama katmanları gibi temel bileşenler de bulunmaktadır. Bu, ağır girişten çıkışa kadar sürekli ve yoğun bir bilgi akışını sağlar. Model, ImageNet veri kümesi üzerinde yapılan sınıflandırma görevlerinde ve diğer çeşitli görsel tanıma görevlerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. DenseNet121, bilgisayarlı görüş alanında derin öğrenme modellerinin geliştirilmesinde önemli bir ilerleme olarak değerlendirilmekte ve yoğun bağlantıların getirdiği avantajlarıyla öne çıkmaktadır [19]. Bu mimari Şekil 7’de sunulmuştur.

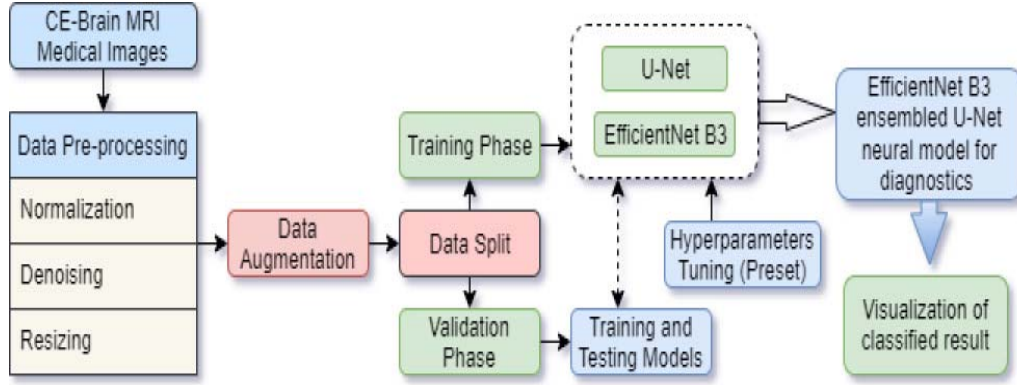


Şekil 7. DenseNet121 mimarisine ait görsel

### 2.1.4. EfficientNetB3

EfficientNetB3, derin öğrenme alanındaki bilgisayarlı görüş görevleri için tasarlanmış yüksek performanslı bir sinir ağı modelidir. EfficientNet serisi, özellikle model boyutu, derinlik ve genişlik

gibi faktörleri dengeli bir şekilde optimize eden bir ölçekleme stratejisi kullanarak etkili ve ölçeklenebilir modeller sunmayı amaçlamaktadır. EfficientNetB3, bu stratejiyi izleyen ve önceki EfficientNet modellerinden daha büyük bir boyuta sahip olan bir versiyondur.



Şekil 8. EfficientNetB3 mimarisi

Model, evrişim katmanları, mobil öğrenme blokları ve genişleyen bloklar gibi özel bileşenleri içerir. Bu, ağı daha fazla öğrenme kapasitesi kazanmasını ve görsel özellikleri daha etkili bir şekilde çıkarmasını sağlar. EfficientNetB3, ImageNet veri kümesinde ve diğer görsel tanıma görevlerinde yüksek doğruluk oranları elde etmiştir. Bu model, derin öğrenme modellerinin büyüklük ve performans dengesini optimize etme çabalarında önemli bir adım olarak kabul edilmektedir [28]. EfficientNetB3 mimarisi Şekil 8’de verilmiştir.

### 2.1.5 Önerilen Model

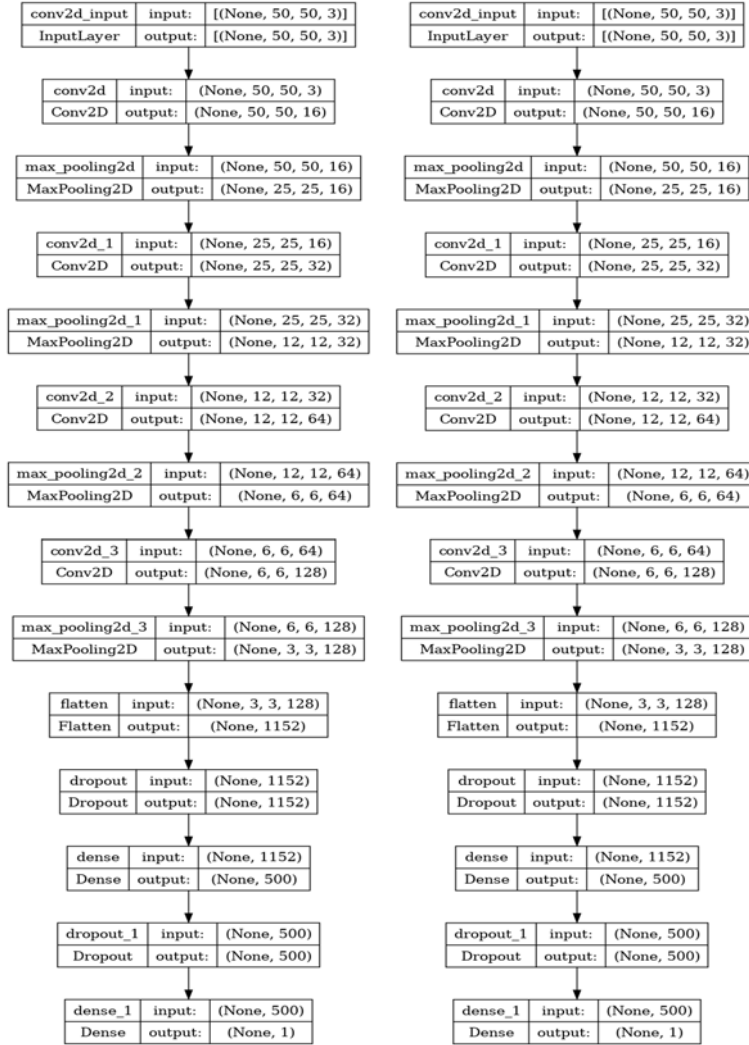
Veri ön işleme, özellik çıkarma ve sınıflandırma, önerilen yöntemin üç aşamasıdır. Bu adımlar Şekil 6’da şematik olarak gösterilmiştir. Veri ön işleme, görüntü kalitesini iyileştirmek için etkili bir stratejidir. Görüntüler, kamera açısı ve mikroskop konumu da dahil olmak üzere çeşitli gürültü kaynakları tarafından kirletilebilir. Görüntüler, görüntü gürültüsünü azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılarak temizlenmiştir. Sıtmanın tespiti için enfekte ve enfekte olmayan görüntüleri verimli bir şekilde sınıflandırmak için önerdiğimiz CNN modeli kullanılmıştır. İlk olarak,  $50 \times 50 \times 3$  boyutlu giriş görüntülerini işlemek için  $2 \times 2$  filtre boyutlarına sahip 4 konvolüsyonel katmanı, ardından  $2 \times 2$  boyutunda 4 maksimum havuzlama katmanı kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU tercih edilmiştir. Son olarak veriyi düzleştirmek için 1 flatten katmanı, 2 Dropout ve 2 Dense katmanı kullanılmıştır. Çıkış katmanı için Sigmoid aktivasyon fonksiyonu uygulanmıştır.

Önerilen yönteme dair detaylı bilgiler, Şekil 9’da açıkça sunulmuştur. Şekil 9’un incelenmesi sonucunda, toplam parametre sayısının 620.441 olduğu görülmektedir. Bu parametrelerin tamamının başarıyla eğitildiği belirtilmiştir. Ayrıca, önerilen modelin şematik gösterimi, Keras Visualization özelliği kullanılarak Şekil 10’da görselleştirilmiştir. Önerilen yöntemin blok diyagramı ise Şekil 11’de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

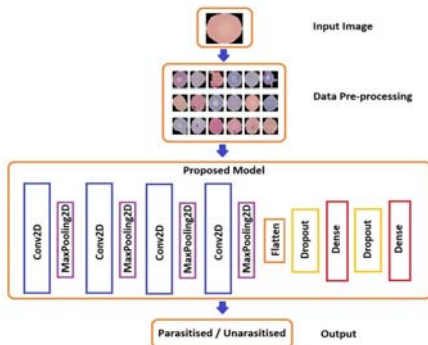
Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d (Conv2D)	(None, 50, 50, 16)	208
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 25, 25, 16)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 25, 25, 32)	2080
max_pooling2d_1 (MaxPooling2D)	(None, 12, 12, 32)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 12, 12, 64)	8256
max_pooling2d_2 (MaxPooling2D)	(None, 6, 6, 64)	0
conv2d_3 (Conv2D)	(None, 6, 6, 128)	32896
max_pooling2d_3 (MaxPooling2D)	(None, 3, 3, 128)	0
flatten (Flatten)	(None, 1152)	0
dropout (Dropout)	(None, 1152)	0
dense (Dense)	(None, 500)	576500
dropout_1 (Dropout)	(None, 500)	0
dense_1 (Dense)	(None, 1)	501

Total params: 620,441  
Trainable params: 620,441  
Non-trainable params: 0

Şekil 9. Önerilen yöntemin detayları



Şekil 10. Önerdiğimiz modelin şematik gösterimi



Şekil 11. Önerdiğimiz modelin blok diyagramı

Sınıflandırma performansını değerlendirmek amacıyla önerilen yöntem, karışıklık matrisi ve bu matristen türetilen çeşitli sınıflandırma değerlendirme ölçütlerini kullanmaktadır. Bu ölçütler arasında doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1 skoru (F1-score) bulunmaktadır. Karışıklık matrisi, Gerçek Pozitif (True Positive-TP), Gerçek Negatif (True Negative-TN), Yanlış Negatif (False Negative-FN) ve Yanlış Pozitif (False Positive-FP) değerlerini içermektedir. Çalışmada, TP, sınıflandırıcının belirli bir parazitli hücre sınıfını doğru bir şekilde tahmin ettiği durumu ifade ederken, TN,

sınıflandırıcının bir hücre görüntüsünün belirli bir parazitli hücre sınıfına ait olmadığını doğru bir şekilde teşhis ettiği durumu yansıtmaktadır. FP, sınıflandırıcının negatif bir örneği yanlış bir şekilde pozitif olarak tahmin ettiği durumu ifade ederken, FN, sınıflandırıcının pozitif bir örneği yanlış bir şekilde negatif olarak tahmin ettiği durumu ifade etmektedir. Şekil 12, karışıklık matrisini görsel olarak temsil etmektedir.

		Actual Values	
		Positive(1)	Negative(0)
Predicted Values	Positive(1)	TP	FP
	Negative(0)	FN	TN

Şekil 12. Confusion matrix

Her hücre türüne göre doğru bir şekilde sınıflandırılan test örneklerinin sayısının, toplam test örnekleri sayısına oranı accuracy olarak adlandırılır ve Eşitlik (1)'deki gibi hesaplanır.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (1)$$

Her hücre türü için doğru bir şekilde sınıflandırılan pozitif örneklerin, gerçek pozitif örneklerin sayısına oranı recall olarak adlandırılır ve Eşitlik (2)'deki formülle hesaplanır.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Her bir hücre türü tarafından doğru bir şekilde sınıflandırılan pozitif örneklerin sayısı ile pozitif olarak sınıflandırılan toplam örneklerin sayısı, precision (kesinlik) tarafından belirlenir ve Eşitlik (3)'deki formülle hesaplanır.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

F1-skoru, kesinlik ve duyarlılık oranlarının harmonik ortalamasını ifade eder. F1-skoru, 0 ile 1

arasında bir değer alır; her bir hücre sınıflandırma modelinin daha iyi performansı, daha yüksek bir F1-skora karşılık gelir ve Eşitlik (4)'teki formülle hesaplanır.

$$F1 - \text{skor} = 2x \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

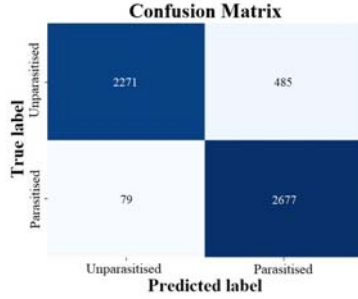
Bu bölümde önceki bölümde sunulan materyaller ve metotlar kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çalışma, insan kırmızı kan hücresi görüntülerinin Plasmodium paraziti tarafından parazitlenmiş veya parazitlenmemiş olarak sınıflandırılmasını içeriyor. Kan hücresinin parazitlenmiş ya da parazitlenmemiş olduğunu tespit etmek için CNN mimarileri kullanılmıştır. Bu çalışmada önceden eğitilmiş CNN mimarilerinden VGG-19, InceptionResNetV2, DenseNet121, EfficientNetB3 ve önerdiğimiz CNN modeli ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda her bir model için Confusion matrisleri verilmiştir.

		Confusion Matrix	
		Unparasitised	Parasitised
True label	Unparasitised	2571	155
	Parasitised	52	2734

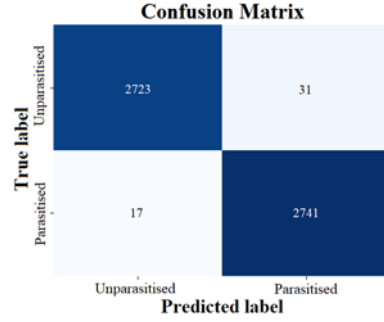
Şekil 13. DenseNet121 Confusion Matrix

		Confusion Matrix	
		Unparasitised	Parasitised
True label	Unparasitised	2646	80
	Parasitised	72	2713

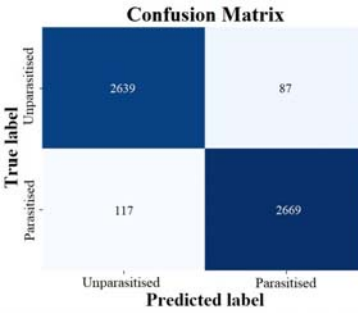
Şekil 14. EfficientNetB3 Confusion Matrix



Şekil 15. InceptionResNetV2 Confusion Matrix



Şekil 17. Proposed Model Confusion Matrix



Şekil 16. VGG19 Confusion Matrix

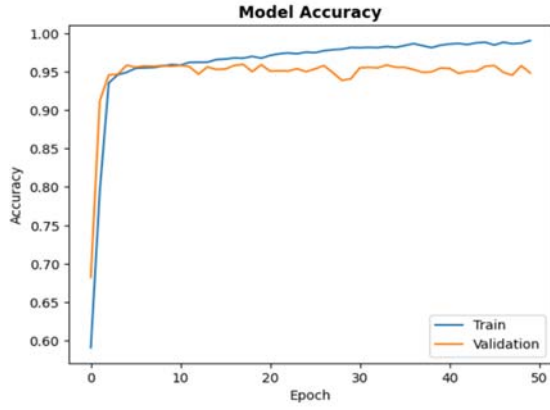
Önerilen görüntü sınıflandırma yönteminin performansı, doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skor açısından önceden eğitilmiş CNN tabanlı yöntemlerle karşılaştırılmıştır, Çizelge 2'de bu karşılaştırma sunulmuştur. Modellerin confusion matrisine dayalı olarak elde edilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-skor değerleri Çizelge 2'de detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

Çizelge 2. Model sonuçlarının karşılaştırılması

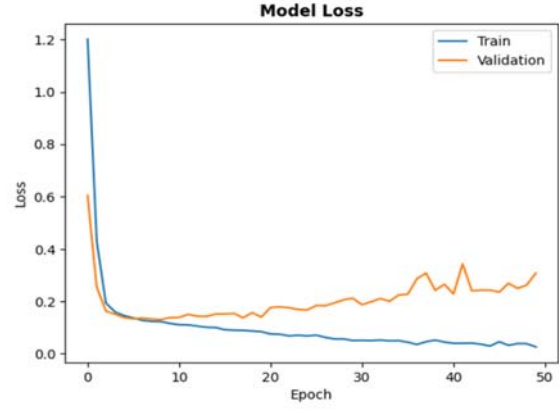
Yöntem	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Geri çağırma (%)	F-Score (%)	Parametre sayısı
VGG19	96,28	96,79	95,73	96,26	26.449.730
InceptionResNetV2	89,76	82,38	96,65	88,95	15.241.025
DenseNet121	96,23	94,31	98,0	96,12	7.304.514
EfficientNetB3	97,23	97,70	97,33	97,20	11.183.665
Proposed Model	98,9	97,98	98,9	98,9	620.441

Tüm yöntemlerde her bir hücre türü için hesaplanan değerlendirme ölçütlerinin ortalama değerleri alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen yöntem, %98,9 doğruluk, %97,98 kesinlik, %98,77 duyarlılık ve %98,9 F1-skor değeri ile en üstün sınıflandırma performansını sergilemektedir. Önerilen yöntemle en yakın sonuçlar %97,23 doğruluk, %97,70 kesinlik, %97,33 duyarlılık ve %97,20 F1-skoru ile EfficientNetB3 modelinden elde edilmiştir. Veri seti için en düşük performans %89,76 doğruluk, %82,38 kesinlik, %96,65 duyarlılık ve %88,95 F1-skoru ile InceptionResNetV2 modelinden kaydedilmiştir. Çizelge 2'deki tüm veriler göz önüne alındığında, önerilen yöntem düşük eğitilebilir parametre sayısı

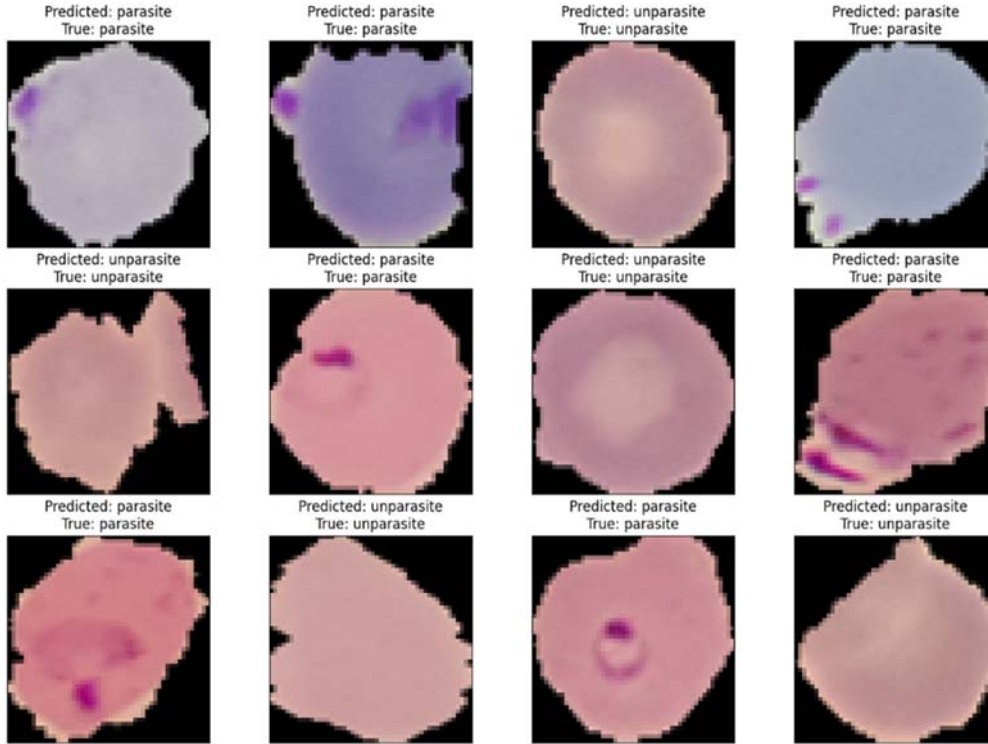
ve üstün sınıflandırma sonuçlarıyla dikkat çekmektedir. Diğer derin öğrenme tabanlı yöntemlerle karşılaştırıldığında, önerilen yöntem yalnızca daha iyi bir sınıflandırma doğruluğu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda daha iyi bir hesaplama verimliliği sunmaktadır. Eğitim-doğrulama doğruluğu, Şekil 18'de, ve eğitim-doğrulama kaybı 50 epoch için Şekil 19'da grafikleştirilmiştir. Epoch değeri arttıkça, eğitim ve doğrulama setlerindeki doğruluk değerleri artmaktadır. Aynı zamanda, eğitim ve doğrulama kayıp eğrileri, epoch değeri arttıkça düşüş göstermektedir. Şekil 20'de, rastgele seçilen bir hücrenin parazitli veya parazitsiz olma tahminini gösteren bir ekran görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 18. Training-validation accuracy curve



Şekil 19. Training-validation loss curve verilmiştir.



Şekil 20. Rastgele seçilmiş hücrelerin parazit durumunun tahmin edilmesi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sıtma hücrelerinin sınıflandırılması için farklı derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır. Önerilen CNN modeli, VGG-19,

InceptionResNetV2, DenseNet121 ve EfficientNetB3 gibi önceden eğitilmiş mimarilerle kıyaslanmıştır. CNN tabanlı mimarilerin sıtma hücre görüntülerini parazitli ve parazitsiz olarak sınıflandırmak için etkili sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın performansını



değerlendirmek için literatürde sıklıkla kullanılan, Ulusal Sağlık Enstitüleri tarafından açık erişim izni olan bir veri seti kullanılmıştır. Bulgular, önerilen modelin kabul edilebilir bir güven düzeyinde doğru ve hızlı bir tespit sağlayabildiği sonucuna varmıştır. Performans değerleri, Çizelge 2'den anlaşılacağı üzere, önerilen CNN modelinin en iyi sınıflandırma sonuçlarını elde ettiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin sıtma teşhisi için yüksek verimlilikle doğru sonuçlar verdiği ve klinik uygulamalarda uzmanlar için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmesi düşüncesini desteklemektedir. En iyi performans gösteren model, daha basit ve daha hızlı sıtma tespitini kolaylaştırmak amacıyla masaüstü tabanlı bir uygulama geliştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, tedavinin güvenilirliğini artırma ve tıbbi uzmanlık eksikliğini çözüme konularında fayda sağlayabileceğine inanılmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Mahajan, H., Rashid, A., Junnarkar, A., 2022. Integration of Healthcare 4.0 and Blockchain Into Secure Cloud-Based Electronic Health Records Systems. *Appl Nanoscience*, 13, 2329-2342
2. Mbanefo, A., Kumar, N., 2020. Evaluation of Malaria Diagnostic Methods as a Key for Successful Control and Elimination Programs. *Trop Med Infect Disease*, 5(2), 102
3. Nema, S., Rahi, M., Sharma, A., Bharti, P.K., 2022. Strengthening Malaria Microscopy Using Artificial Intelligence-Based Approaches in India. *Lancet Reg Health-Southeast Asia*, 3(5), 100054
4. W.H. Organization, 2021. Malaria Microscopy Quality Assurance Manual-Version 2. World Health Organization, 140.
5. Alhayani, A., Bilal, S.A., Hamid, N., 2022. Optimized Video Internet of Things Using Elliptic Curve Cryptography Based Encryption And Decryption. *Comput Electr Eng.*, 101, 108022.
6. Alhayani, B., Kwekha-Rashid, A.S., Mahajan, H.B., 2022. Standards For The Industry 4.0 Enabled Communication Systems Using Artificial Intelligence: Perspective of Smart Healthcare System. *Appl Nanoscience*, 13, 1807-1817.
7. Daid, R., Kumar, Y., Gupta, A., Kaur, I., 2021. An Effective Mechanism for Early Chronic Illness Detection Using Multilayer Convolution Deep Learning Predictive Modelling. In 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI), IEEE, 649-652.
8. Bansal, K., Bathla, R.K., Kumar, Y., 2022. Deep Transfer Learning Techniques with Hybrid Optimization in Early Prediction and Diagnosis of Different Types of Oral Cancer. *Soft Comput* 26(21), 11153-11184.
9. Beck, H.P., 2022. Digital Microscopy and Artificial Intelligence Could Profoundly Contribute to Malaria Diagnosis in Elimination Settings. *Front Artif Intell*, 17(5), 510483.
10. Kumar, Y., Koul, A., Mahajan, S., 2022. A Deep Learning Approaches and Fastai Text Classification to Predict 25 Medical Diseases from Medical Speech Utterances, Transcription and Intent. *Soft Comput*, 26(17), 8253-8272.
11. Narayanan, B.N., Ali, R., Hardie, R.C., 2019. Performance Analysis of Machine Learning and Deep Learning Architectures for Malaria Detection on Cell Images. In: Zelinski ME, Taha TM, Howe J, Awwal AAS, Iftekharruddin KM (Eds) *Applications of Machine Learning*. SPIE, Bellingham, 11139, 240-249.
12. Alsunbuli, B.N., Ismail, W., Mahyuddin, N.M., 2021. Convolutional Neural Network and Kalman Filter-Based Accurate CSI Prediction for Hybrid Beamforming under A Minimized Blockage Effect in Millimeter-Wave Network. *Appl Nanosci*, 13, 1539-1560.
13. Aslan, E., Özüpak, Y., 2024. Classification of Blood Cells with Convolutional Neural Network Model. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 314-326.
14. Malihi, L., Ansari-Asl, K., Behbahani, A., 2013. Malaria Parasite Detection in Giemsa-Stained Blood Cell Images, 8th Iranian Conference on Machine Vision And Image Processing (MVIP), Zanjan, 360-365.
15. Memeu A., Daniel, M., 2014. A Rapid Malaria Diagnostic Method Based on Automatic Detection and Classification of Plasmodium

- Parasites in Stained thin Blood Smear Images. University of Nairobi, 44(1), 69-78.
16. Prasad, K., Winter, J., Bhat, U.M., Acharya, R.V., Prabhu, G.K., 2012. Image Analysis Approach for Development of A Decision Support System for Detection of Malaria Parasites ,n Thin Blood Smear Images. J Digit Imaging, 25(4), 542-549.
  17. Kumarasamy, S.K., Ong, S.H., Tan, K., 2011. Robust Contour Reconstruction of Red Blood Cells and Parasites in the Automated Identification of the Stages of Malarial Infection. Mach Vis Appl., 22(3), 461-469.
  18. Liang, Z., Fulfilmenti, P., 2017. Automatic Image Recognition of Rapid Malaria Emergency Diagnosis: A Deep Neural Network Approach. The Degree Master of Arts.
  19. Quan, Q., Wang, J., Liu, L., 2020. An Effective Convolutional Neural Network for Classifying Red Blood Cells in Malaria Diseases. Interdiscip Sci Comput Life Sci., 12, 217-225.
  20. Rajaraman, S., Antani, S., Pootschi, M., Silamut, K., Hossain, M., 2018. Pre-Trained Convolutional Networks as Feature Extractors Toward Improved Malaria Parasite Detection in Thin Blood Smear Images. Peer J., 6(4), 4578.
  21. Kakkar, B., Goyal, M., Johri, P., 2023. Artificial Intelligence-Based Approaches for Detection and Classification of Different Classes of Malaria Parasites Using Microscopic Images: A Systematic Review. Arch Computat Methods Eng, 30, 4781-4800.
  22. Neha, S., Radim, B., Malay, D., 2022. A Vision Transformer Based Approach for Analysis of Plasmodium Vivax Life Cycle for Malaria Prediction Using Thin Blood Smear Microscopic Images. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 224, 106996.
  23. Gourisaria, M.K., Das, S., Sharma, R., Rautaray, S.S., Pandey, M., 2020. A Deep Learning Model for Malaria Disease Detection and Analysis Using Deep Convolutional Neural Networks. International Journal on Emerging Technologies, 11(2), 699-704.
  24. Krishnadas, P., Chadaga, K., Sampathila, N., Rao, S., Swathi, S.K., Prabhu, S., 2022. Classification Of Malaria Using Object Detection Models. Informatics, 9(4), 76-86.
  25. Muqdad, A., Abdullahi, A.I., 2022. Malaria Parasite Detection Using Deep Learning Algorithms Based on (Cnns) Technique. Computers and Electrical Engineering, 103, 108316.
  26. Yufeng, Z., Clifford, Y., Alex, M., 2018. Breast Cancer Screening Using Convolutional Neural Network and Follow-Up Digital Mammography. Proc. SPIE 10669, Computational Imaging III. 1066905.
  27. Hamid, M., Farhad, S., 2020. An Object Based Framework for Building Change Analysis Using 2D and 3D Information of High Resolution Satellite Images. Advances in Space Research, 66(6), 1386-1404.
  28. Dudeja, T., Dubey, S.K., Bhatt, A.K., 2023. Ensembled EfficientNetB3 Architecture for Multi-Class Classification of Tumours in MRI Images, 395-414.

## Physical and Chemical Properties of a New Cellulose Fiber Extracted from the *Mentha pulegium L.* (Pennyroyal) Plant's Stem

Sabih OVALI\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6370-1977

Oğuz ERYILMAZ<sup>2</sup> ORCID 0000-0003-0005-1142

<sup>1</sup>Adıyaman University, Engineering Faculty, Department of Textile Engineering, Adıyaman, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara University, Technology Faculty, Department of Textile Engineering, İstanbul, Türkiye

Geliş tarihi: 02.01.2024 Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: OVALI, S., ERYILMAZ, O., (2024). Physical and Chemical Properties of a New Cellulose Fiber Extracted from the *Mentha pulegium L.* (Pennyroyal) Plant's Stem. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 211-220.

### Abstract

Ecological problems, high cost, and non-renewability of petroleum and its derivatives have increased the research on new sustainable natural products. For this purpose, the physical, chemical, and mechanical properties of *Mentha pulegium L.* (MPL) fiber, which may have potential for use in textile and composite sectors, were determined by extraction and characterization. Fiber density, length, and diameter were detected by physical tests. Cellulose, hemicellulose, and lignin ratios of the fiber were obtained by chemical analysis and confirmed by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic analysis. The surface morphology was identified by scanning electron microscopy (SEM) analysis, and the chemical components on the fiber surface were discovered by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis. Thermal degradation values of the fiber were found by thermogravimetric analysis (TGA), and the fiber's mechanical properties were determined by tensile test. As a result of the tests and analysis, MPL fiber has shown that it has potential for use in textiles and fiber reinforced composites.

**Keywords:** *Mentha pulegium L.*, Sustainability, Natural fiber, Composite, Textile

### Yaban Nanesi (Yarpuz) Bitkisinin Gövdesinden Ekstrakte Edilmiş Yeni Bir Selülozik Lifin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

### Öz

Petrol ve türevlerinin ekolojik problemleri, yüksek maliyeti ve yenilenebilir olmayışı sürdürülebilir yeni doğal ürünlere olan araştırmaları artırmıştır. Bu amaçla tekstil ve kompozit sektöründe kullanım potansiyeli olabilecek yaban nanesi lifinin eldesi ve karakterizasyonu yapılarak fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Fiziksel testler ile lifin yoğunluk değeri, uzunluk ölçümü ve lif çapı ölçülmüştür. Kimyasal analizler ile lifin selüloz, hemiselüloz, lignin oranları tespit edilerek, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopik analizi ile doğrulanmıştır. Yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM)

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Sabih OVALI, sovali@adiyaman.edu.tr

analizi ile belirlenerek, X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizi ile de lifin yüzeyinde yer alan kimyasal bileşenler saptanmıştır. Yaban nanesi lifine uygulanan termogravimetrik analiz (TGA) ile lifin termal bozunma değerleri, çekme testi ile de mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Yapılan testler ve analizlerin sonucunda yaban nanesi lifi tekstilde ve lif takviyeli kompozitlerde kullanım potansiyeli olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yaban nanesi, Sürdürülebilirlik, Doğal lif, Kompozit, Tekstil

## 1. INTRODUCTION

In today's world where concepts such as environmentally friendly, renewable, sustainable, etc. are gaining importance, studies on new natural fibers are increasing [1,2]. Natural fibers, utilized in various industrial fields, are preferred as reinforcement elements in composite/bio composite production due to their specific properties, including low density, biodegradability, sourcing from natural origins, high specific strength, and easy availability of raw materials [3-5]. Supplements of natural fibers are derived from the fruits, leaves, and stems of plants [6].

Factors such as geographical growing conditions, extraction method, and maturity of the plants from which natural fibers are obtained, determine the physical structure and chemical composition of the fiber [7,8]. Therefore, in order to develop cellulose-based fiber-reinforced composites with high mechanical properties, it is important to determine the physical and chemical properties of the fiber through characterization processes. Fibers with high cellulose content generally have high strength. At the same time, lightweight composites can be produced with low-density fibers [8,9]. Hemp, flax, and sisal are widely used as natural fiber reinforcements in composite production [10]. However, the need for new natural fibers is increasing with the developing composite industry.

In this section, recent studies on new natural fibers are presented. New cellulose-based fibers such as *Ficus Carica* [11], *Thespesia populnea* [12], *Phaseolus vulgaris* [13], *Arenga Pinnata (Wrumb)* [14], *Cajanus cajan* [15], *Cissus quadrangularis* [16], *Ficus benjamina L.* [17] are presented in the literature as a result of the characterization of fibers obtained from trees and plants and it was concluded that they are suitable for utilization as reinforcing

fibers in composite production. Natural fiber research from plants and trees and relevant new studies about them are being added to these examples every day.

The pennyroyal plant, which has the Latin name *Mentha pulegium L.*, is a pungent-smelling perennial herb with pubescent stems and leaves that can reach 10-30 cm in height and grow widely in the Mediterranean region of Turkey [18]. It is harvested on the mountain slopes and along the water banks, in moist and watery areas. Today, MPL is cultivated as a medicinal plant in various regions of Turkey. Both the leaf stalks and the stems of MPL are dried and used for medicinal purposes.

There is no study about its use in fiber-reinforced composite production in the literature. For this reason, in this study, the potential for use in composite or bio-composite production was investigated by characterizing the fibers obtained from the MPL plant's stem.

The physical and chemical properties of MPL fiber were examined through X-ray diffraction (XRD), FTIR, and TGA as well as the chemical structure analysis. The results were then utilized to investigate the applicability of MPL fiber in composite or textile production.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The MPL fiber used in this study was collected from the hills of Sarıçam district of Adana province, located in the Mediterranean region of Turkey. In order to obtain the MPL fiber, the leaf parts were cut and removed in the first phase. Secondly, the stem parts of the plant were kept in a bucket of pure water for 10 days to give microorganisms time to act on the shell. After that, the fibers were separated and then dried in daylight for 48 hours. Figure 1

displays the MPL plant (a) along with the fibers extracted from the stem part (b), and, tuft of MPL fiber samples (c).

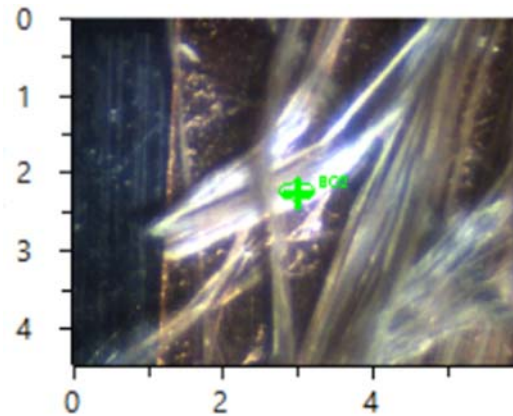


**Figure 1.** The digital images of (a) MPL plant, (b) obtained MPL stem fibers (c) combed MPL samples

The density of MPL fiber was calculated according to ASTM D8171-18 standard, while its cellulose, hemicellulose, and lignin content was calculated according to Mysamy and Rajendran method [19].

To determine the mean fiber length, 100 fibers were randomly selected from a tuft of MPL fiber sample. Each fiber was straightened, and its length was measured with a ruler. The mean, standard deviation (SD), and coefficient of variation (CV) were computed using the measured MPL fiber length.

The atomic and chemical components (carbon, oxygen, etc.) of the fiber surface were determined by XPS on a ThermoScientific K-Alpha instrument. In Figure 2, the XPS analysis image of MPL fiber is shown.



**Figure 2.** XPS surface measurement of MPL fiber

The molecular bond characterization of MPL fiber was performed by using FTIR spectroscopy, and its functional groups were identified between the 610-4000  $\text{cm}^{-1}$  wave number range in a Perkin Elmer Spectrum BX X FTIR instrument. The crystallographic properties of the fiber and the relevant phases were determined by using the PANalytical XPert Pro MPD device with a  $\text{Cu-K}\alpha$  beam source. The crystallinity index (CI) was deduced from the data generated by the reflection of the XRD pattern. The crystallinity index value was then calculated by using Equation (1) [20].

$$\text{CI (\%)} = (I_{200} - I_{\text{am}}) / I_{200} \quad (1)$$

In equation 1,  $I_{200}$  and  $I_{am}$ , indicate the presence of amorph and crystalline regions in the fiber, respectively, and are used to calculate the crystallinity index percentage [21,22]. To determine the temperature and time-dependent mass loss of the fiber a Seiko SII TG/DTA 7200 device was used for TGA analysis.

The single fiber tensile tests of MPL fiber were performed by calculating the averages and standard deviations of the 30 repetitive tensile tests' results on 10 mm long fibers at a process speed of 0.1 mm/min under 50 N load on an INSTRON universal tester by complying with the ASTM D3822-07 standard. The surface properties such as surface

structure, fiber diameter, surface porosity, etc. of MPL fiber were examined in a high-resolution SEM-ZEISS/EVO LS10 device.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

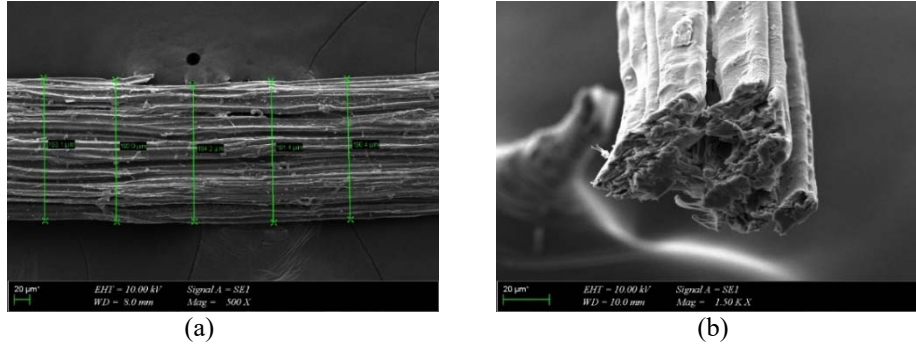
The density of MPL fiber was determined as 1.4218 g/cm<sup>3</sup>, which is similar to halfa grass (alpha) fiber [23], and lower than that of sisal, ramie, and palm tree fibers [24]. Since low density (lightweight) is one of the main properties expected in cellulose-based fiber-reinforced composites, MPL fiber may be a good option. In Table 1, the comparison of the mechanical properties of MPL fiber along with other fibers is given.

**Table 1.** Comparison of the mechanical properties of MPL fiber along with other natural plant fibers

Fiber name	Fiber diameter (µm)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation (%)	Ref
<i>Mentha pulegium L.</i>	190.83±5.46	84.45±18.28	4.26± 0.7	3.27±0.64	This Study
Coconut	380 ±90	44±8	2.0 ±0.3	4.5 ±0.8	[6]
Root	100-650	157	6.2	3	[25]
Coconut tree leaf sheath	-	119.8	18	5.5	[25]
Alfa stems	90-120	134-220	13-17.8	-	[6,26,27]
Palm Tree Fruit	-	65.2	4.9	47.2	[6,28]
Corn husk	0.186	160.49	4.57	2.08	[24]
Palm Tree	-	248	3.2	28	[24]
Rami	50	220-938	44-128	2-3	[24]
Sisal	50-300	511-635	9-22	2-2.5	[24]

Length and fineness are key characteristics of the fiber's spinnability in yarn production. MPL has an average length of 89.4 mm with a length range of 60 to 120 mm. It can be observed that MPL has an average length in a comparable range to flax fibers (60-90 mm) [29]. The calculated SD and CV of the measured fibers are 16.55 mm and 18.51%, respectively. The mechanical tests of MPL fiber provided similar results to the natural fibers given in Table 1. The mechanical properties of cellulose-

based fibers are directly affected by the physical structure as well as the chemical component ratios [6,26,27]. When the literature on natural fibers is investigated, their mechanical properties and values vary greatly. These variations depend on factors such as growing conditions and plant properties, as well as fiber extraction method, harvesting period, and the maturity, etc. [30]. SEM images of the MPL fiber's transverse and longitudinal sections are shown in Figure 3.



**Figure 3.** SEM images of MPL fiber's (a) longitudinal section, (b) transverse section

When the longitudinal section image given in Figure 3 (a) is examined, the fiber diameter is approximately 190.83  $\mu\text{m}$ . This value was determined by calculating the average of the measurements taken from this image.

The average diameter value of MPL fiber was found to be thicker than that of corn husk, ramie, and halfa grass fibers [24], while thinner than that of root [26], and coconut fibers [6]. It was seen that there are irregularities as well as impurities on the fiber surface (oil, wax, lignin, etc.) [31]. The irregularities seen on the fiber surface increase the surface roughness. It is known that the use of fibers with rough surfaces in composite structures contributes to the bonding and the interfacial

compatibility of fiber and the matrix by causing mechanical interlocking between them. Thus, using fibers with surface roughness as reinforcing elements in composites provides a great advantage [22].

The chemical compositions of MPL and other natural plant fibers are given in Table 2. The chemical composition ratios that comprise the fiber structure are affected by the environmental conditions, the extraction methods, and the soil properties where the plant grows [32]. The main chemical components of MPL fiber consist of cellulose (59.1%), hemicellulose (15.93%), and lignin (22.15%).

**Table 2.** The main chemical constituents of MPL and other natural plant fibers

Fiber	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Ref
<i>Mentha pulegium L.</i>	59.1	15.93	22.15	Current study
<i>Acacia nilotica L.</i>	56.46	14.14	8.33	[32]
Alfa stems	45	24	24	[6,26,27]
Bagasse	55	17	25	[6]
Coir	26.8 – 43	17.2 – 37	22.2 – 45	[6]
Bamboo	26	31	30	[33]
Corn husk	46.15	33.79	3.91	[24]
Ramie	68.6 – 85	13 – 16.7	0.5 – 0.7	[24]
Sisal	60 – 78	10 – 14.2	8 – 14	[24]

It was determined that the MPL fiber has a higher cellulose content compared to that of prickly acacia, halfa grass, sugarcane coconut, bamboo, and the corn stover fibers given in Table 2. The relatively high cellulose content of fiber positively affects its mechanical properties [32], while other properties such as biodegradability, moisture absorption, thermal change, etc. usually vary depending on the fiber's hemicellulose content [33]. Here, 15.93% of the hemicellulose content in MPL fiber is found to be similar to that of prickly acacia [32], coconut [6], ramie [24], and sisal fibers [24]. The ratio of lignin, one of the main chemical components, directly affects both the structure and the surface morphology of the fiber [33]. Here, the lignin content of MPL fiber is found to be higher than that of *Acacia nilotica L.* [32], corn husk [24], and ramie fibers, while lower than that of bagasse [6], coconut [6], and bamboo fibers [33].

Both the chemical structure and the surface formation of MPL fibers were investigated by using the XPS analysis method. According to the as-obtained analysis data, the atomic surface elements detected on the fiber surface are shown in Table 3.

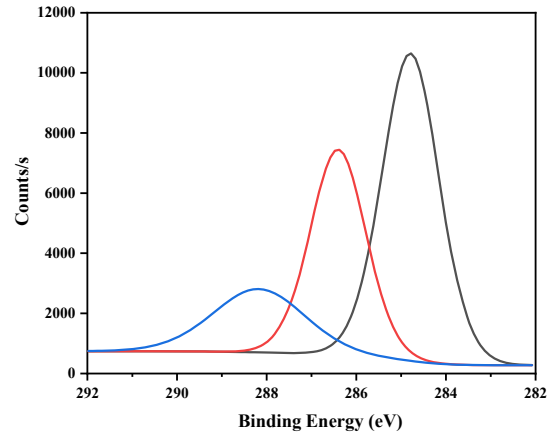
**Table 3.** The atomic surface components of MPL fiber

Atomic surface elements (%)				
Fiber	C1s	O1s	N1s	Si2p
MPL	62.3	22.9	0.7	2.32

The elemental composition of MPL fiber surface was determined as 62.3% of carbon (C1s), 22.9% of oxygen (O1s), 0.7% of nitrogen (N1s), and 2.32% of silicon (Si2p). The calculated Oxygen/Carbon (O/C) and Carbon/Oxygen (C/O) ratios of 0.36 and 2.72, respectively, of MPL fiber indicate the hydrophilic or hydrophobic character of its surface. Here, increasing the C/O ratio decreases the hydrophilicity of the fiber surface, and improves the fiber-matrix compatibility in composites [34].

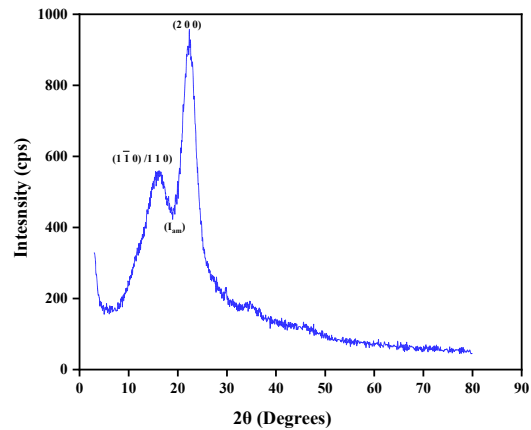
The C1s XPS spectrum curves of MPL fiber are shown in Figure 4. Here, the peak at 284.78 eV (C-C/C-C-H) represents the presence of hemicellulose and lignin, while the peak at 286.48 eV (C=O/O-C-

O) represents the carbonyl groups, and the peak at 288.28 eV (O-C=O) represents either ester, carboxylic acid groups or lignin's presence [35].



**Figure 4.** C1s XPS spectrum peaks of MPL fiber

The XRD curves of MPL fiber are given in Figure 5. Here, the two main peaks seen at 18.53° and 22.39° indicate the basic structure of cellulose I and IV, respectively. At the same time, these two planes indicate (1 1 0 / 1 1 0) and (2 0 0) crystallographic regions, respectively [36].



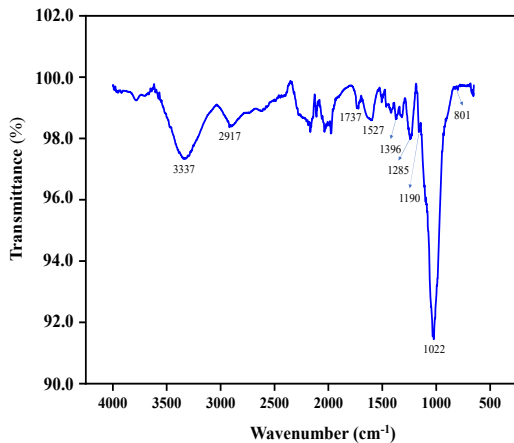
**Figure 5.** XRD curve of MPL fiber

Based on eq. (1), the crystallinity index (CI) value of MPL fiber was calculated as 53.97%. Compared to the CI values of other natural fibers in the literature such as cotton (60%), sisal (71%), jute (71%), flax (80%), and hemp (88%), it shows that



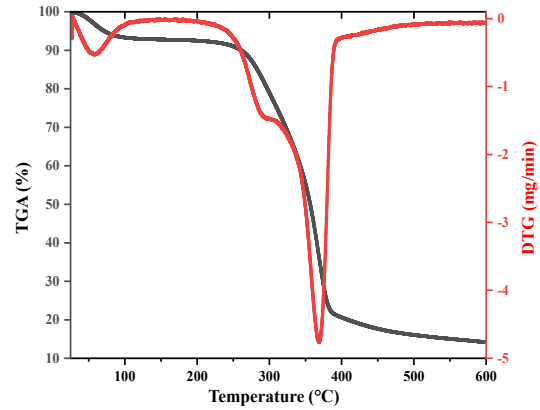
the crystallinity of MPL fiber (53%) seems less regular [37].

The FTIR analysis was performed to investigate the chemical structure of MPL fiber, and its spectrum is given in Figure 6. Here, the peak at  $3337\text{ cm}^{-1}$  shows the hydrogen bonds and the -OH stretching in the cellulose structure [38]. The CH ( $\text{CH}_2$  and  $\text{CH}_3$ ) vibration of the cellulose and hemicellulose components' alkyl groups generated a peak at  $2917\text{ cm}^{-1}$  [39]. The peak at  $1737\text{ cm}^{-1}$  corresponds to the C=O tensions in carboxyl acid or acetyl groups, and C=C vibrations in aromatic rings in lignin correspond to the peak at  $1527\text{ cm}^{-1}$  [40,41]. The peak at  $1396\text{ cm}^{-1}$  is the bending vibration of C-H groups, while the peak at  $1285\text{ cm}^{-1}$  indicates C-O tensions in acetyl groups in hemicellulose, and the small peak at  $1190\text{ cm}^{-1}$  indicates the C-O-C asymmetric tensions [40–42]. The peak observed at  $1022\text{ cm}^{-1}$  indicates the aldehyde/acid/carboxylate functional groups, whereas the amorphous and crystalline cellulosic structures of the fiber can be understood from the peaks at  $1464\text{ cm}^{-1}$ , and  $801\text{ cm}^{-1}$ , respectively [41].



**Figure 6.** FTIR spectrum of MPL fiber

It is important to determine the effect of different temperature values on the fiber. In particular, it is necessary to determine the thermal degradation values of natural fibers that are used in the production of thermoplastic-based composites [22,43,44]. The mass loss of MPL fiber at different temperature values is shown in Figure 7.



**Figure 7.** TGA-DTG curve of MPL fiber

Here, the subsequent degradation was determined at  $290.34^\circ\text{C}$ . This temperature value corresponds to the decomposition of hemicellulose in fiber's chemical structure [45]. The temperature value showing the decomposition of cellulose and lignin in the fiber structure was observed at  $369.18^\circ\text{C}$  [46]. When the studies conducted in the literature were examined, it was seen that the thermal degradation temperature of MPL fiber is similar to that of sisal ( $340^\circ\text{C}$ ), jute ( $365^\circ\text{C}$ ), and flax ( $345^\circ\text{C}$ ) fibers [47].

The thermal analysis conducted between  $30\text{--}600^\circ\text{C}$  indicated 85% of mass loss in the fiber structure. As a result of the TGA analysis, it was concluded that MPL fiber can be used as a reinforcing fiber in composite structures under an initial temperature of  $290.34^\circ\text{C}$  [48].

#### 4. CONCLUSION

In this study, a cellulose-based fiber extracted from the stem of an MPL plant was characterized, and its potential for use in composites was investigated. The physical, chemical, mechanical, morphological, and the thermal properties are determined by the fiber characterization processes. The MPL fiber's low density value of  $1.42\text{ g/cm}^3$  provides an advantage in composite and textile production. MPL fibers are found to have a 59.1% cellulose ratio in their structure, which enhances the mechanical properties of fiber-reinforced composites. Having a 53.97% crystallinity index

ratio makes the MPL fiber rich in terms of cellulose. It was also understood from the results that the MPL fiber has better mechanical properties than some other fibers used in composite production with 84.45 MPa of tensile strength, and 4.26 GPa of modulus values. The chemical component details of MPL fiber were determined by FTIR analysis, while the chemical components in its surface structure were determined by XPS surface analysis, and it was understood that MPL fiber has a hydrophobic character compared to other fibers. Both MPL fiber's surface morphology, and its diameter were measured by SEM analysis, and it was seen that this fiber can be used in composites with its current structure. As a result of thermal analysis, it was determined that the fiber structure can remain intact at temperatures below 290°C, and will contribute positively to fiber reinforced composite structures. MPL fiber can also be used in the textile sector in combination with other synthetic fibers to lower the need for petroleum-based fiber production. Furthermore, since MPL's fiber length and fineness are comparable to those of flax, it can be utilized as a blended yarn.

## 5. REFERENCES

1. Abedi, M., Hassanshahi, O., Rashidell, A., Ashtari, H., Seddik, M.M., Dias D, Arjomand, M.A., Keong, C.K., 2023. A Sustainable Cementitious Composite Reinforced with Natural Fibers: An Experimental and Numerical Study. *Construction and Building Materials*, 378, 131093.
2. Akhil, U.V., Radhika, N., Saleh, B., Aravind, K.S., Noble. N., Rajeshkumar, L., 2023. A Comprehensive Review on Plant-Based Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Composites*, 44(5), 2598-2633.
3. Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P., Sain, M., 2014. Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26.
4. Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S., 2007. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25-33.
5. Yildiz, Z., Eryilmaz, O., 2023. Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites, Woodhead Publishing, Midani, M., 12 - Preimpregnated Natural Fiber Preforms, 327-340.
6. Chichane, A., Boujmal, R., El Barkany, A., 2023. Bio-composites and Bio-Hybrid Composites Reinforced with Natural Fibers: Review. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3471-3479.
7. Kathirselvam, M., Kumaravel, A., Arthanarieswaran, V.P., Saravanakumar, S.S., 2019. Isolation and Characterization of Cellulose Fibers from Thespesia Populnea Barks: A Study on Physicochemical and Structural Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 396-406.
8. Raja, K., Prabu, B., Ganeshan, P., Chandra, S. V.S., Nagaraja, G., 2021. Characterization Studies of Natural Cellulosic Fibers Extracted from Shwetark Stem. *Journal of Natural Fibers* 18(11), 1934-1945.
9. Eryilmaz, O., Sancak, E., 2021. Effect of Silane Coupling Treatments on Mechanical Properties of Epoxy Based High-Strength Carbon Fiber Regular (2x2) Braided Fabric Composites. *Polymer Composites*, 42(12), 6455-6466.
10. Bulut, Y., Erdoğan, Ü.H., 2011. Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. *Tekstil ve Mühendis*, 18, 82.
11. Selvaraj, M.P.N., Ravichandran, P.T., Bhuvaneshwaran, M., Samson, S., 2023. Extraction and Characterization of a New Natural Cellulosic Fiber from Bark of Ficus Carica Plant as Potential Reinforcement for Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 2194699.
12. Pandiarajan, P., Kathiresan, M., Baskaran, P.G., Kanth, J., 2022. Characterization of Raw and Alkali Treated New Cellulosic Fiber from the Rinds of Thespesia Populnea Plant. *Journal of Natural Fibers*, 19(11), 4038-4049.
13. Gurukarthik, B.B., Prince, W.D., SenthamaraiKannan, P., Saravanakumar, S.S., Sanjay, M.R., 2019. Study on Characterization and Physicochemical Properties of New Natural Fiber from Phaseolus Vulgaris. *Journal of Natural Fibers*, 16(7), 1035-1042.

14. Aliyu, I., Sapuan, S.M., Zainudin, E.S., Rashid, U., Zuhri, M.Y.M., Yahaya, R., 2023. Characterization of Ash from Sugar Palm [Arenga Pinnata (Wrumb) Merr. Fiber for Industrial Application. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2170943.
15. Shyam, K.R., Balasundar, P., Al-Dhabi, N.A., Prithivirajan, R., Ramkumar, T., Bhat, K.S., Senthil, S., Narayanasamy, P., 2021. A New Natural Cellulosic Pigeon Pea (Cajanus cajan) Pod Fiber Characterization for Bio-degradable Polymeric Composites. *Journal of Natural Fibers* 18(9), 1285-1295.
16. Indran, S., Edwin, R.R., Sreenivasan, V.S., 2014. Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from Cissus Quadrangularis Root. *Carbohydrate Polymers*, 110, 423-429.
17. Joe, M.S., Sudherson, D.P.S., Suyambulingam, I., Siengchin, S., 2023. Extraction and Characterization of Novel Biomass-Based Cellulosic Plant Fiber From Ficus Benjamina L. Stem for A Potential Polymeric Composite Reinforcement. *Biomass Convers Biorefinery*.
18. Çötel, E., Erden, Y., Karataş, F., 2013. Yarpuz (Mentha pulegium L.) Bitkisindeki Malondialdehit, Glutasyon ve Vitamin Miktarları ile Total Antioksidan Kapasitesinin Araştırılması. *Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science*, 17(2), 4-10.
19. Mylsamy, K., Rajendran, I., 2010. Investigation on Physio-chemical and Mechanical Properties of Raw and Alkali-treated Agave Americana Fiber. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(19), 2925-2935.
20. Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E., Conrad, C.M., 1959. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10), 786-794.
21. French, A.D., 2014. Idealized Powder Diffraction Patterns For Cellulose Polymorphs. *Cellulose*, 21(2), 885-896.
22. Ovalı, S., 2023. Characterization of Lignocellulosic Glycyrrhiza Glabra Fibers As A Potential Reinforcement for Polymer Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(11), 4241-4256.
23. El-Abbassi, F.E., Assarar, M., Ayad, R., Bourmaud, A., Baley, C., 2020. A review on Alfa Fibre (Stipa tenacissima L.): from the Plant Architecture to the Reinforcement of Polymer Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 128, 105677.
24. Raju, J.S.N., Depoures, M.V., Shariff, J., Chakravarthy, S., 2021. Characterization of Natural Cellulosic Fibers from Stem of Symphirema Involucratum Plant. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5355-5370.
25. Sanjay, M.R., Madhu, P., Jawaid, M., Sentharamaikkannan, P., Senthil, S., Pradeep, S., 2018. Characterization and Properties of Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566-581.
26. Bessadok, A., Marais, S., Gouanvé, F., Colasse, L., Zimmerlin, I., Roudesli, S., Métayer, M., 2007. Effect of Chemical Treatments of Alfa (Stipa Tenacissima) Fibres on Water-Sorption Properties. *Composites Science and Technology*, 67(3), 685-697.
27. Hamza, S., Saad, H., Charrier, B., Ayed, Naceur., Bouhtoury, F.C., 2013. Physico-Chemical Characterization of Tunisian Plant Fibers and its Utilization as Reinforcement for Plaster Based Composites. *Industrial Crops and Products*, 49, 357-365.
28. Sudhakara, P., Jagadeesh, Dani., Wang, Y., Prasad, C.V., Devi, A.P.K., Balakrishnan, G., Kim, B.S., Song, J.I., 2013. Fabrication of Borassus Fruit Lignocellulose Fiber/PP Composites and Comparison with Jute, Sisal and Coir Fibers. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 1002-1010.
29. Bar, G., Chaudhary, K., 2023. Characterization of Textile Grade Novel Bauhinia Vahlia Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2143464.
30. Alves, F.M.E., Pereira, T.V.C., Gomes, O.F.M., Flávio de A.S., Filho, R.D.T., 2013. The Effect of Fiber Morphology on the Tensile Strength of Natural Fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149-157.
31. Sentharamaikkannan, P., Kathiresan, M., 2018. Characterization of Raw and Alkali Treated New Natural Cellulosic Fiber from Coccinia Grandis L. *Carbohydrate Polymers*, 186, 332-343.

32. Kumar, R., Sivaganesan, S., Senthamaraikannan, P., Saravanakumar, S.S., Khan, A., Ajith A.D.S., Loganathan, L., 2022 Characterization of New Cellulosic Fiber from the Bark of *Acacia nilotica* L. *Plant. Journal of Natural Fibers*, 19(1), 199-208.
33. Saravana, K.A., Senthilkumar, A., Sornakumar, T., Saravanakumar, S.S., Arthanariesewaran, V.P., 2019. Physicochemical Properties of New Cellulosic Fiber Extracted from *Carica Papaya* Bark. *Journal of Natural Fibers*, 16(2), 175-184.
34. Šernek, M., Kamke, F.A., Glasser, W.G., 2004. Comparative Analysis of Inactivated. *Wood Surfaces*, 58(1), 22-31.
35. Tran, L.Q.N, Yuan, X.W, Bhattacharyya, D., Fuentes, C., Van Vuure, A.W., Verpoest, I., 2015. Fiber-matrix Interfacial Adhesion in Natural Fiber Composites. *International Journal of Modern Physics*, 29, 1540018.
36. Sreenivasan, V.S., Somasundaram, S., Ravindran, D., Manikandan, V., Narayanasamy, R., 2011, Microstructural, Physico-Chemical and Mechanical Characterisation of *Sansevieria Cylindrica* Fibres – An Exploratory Investigation. *Materials & Design* 32(1), 453-61.
37. Elenga, R.G., Dirras, G.F., Goma Maniongui, J., Djemia, P., Biget, M.P., 2009. On the Microstructure and Physical Properties of Untreated *Raffia Textilis* Fiber. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(4): 418-22.
38. Porras A, Maranon, A., Ashcroft, I.A., 2015. Characterization of a Novel Natural Cellulose Fabric From *Manicaria Saccifera* Palm As Possible Reinforcement of Composite Materials. *Composites Part B: Engineering*, 74, 66-73.
39. Ilaiya P.C., Sarala, R., 2020. Characterization of a New Natural Cellulosic Fiber Extracted from *Derris Scandens* Stem. *International Journal of Biological Macromolecules* 165, 2303-2313.
40. Manimaran, P., Saravanan, S.P., Sanjay, M.R., Jawaid, M., Siengchin, S., Fiore, V., 2020. New Lignocellulosic *Aristida Adscensionis* Fibers as Novel Reinforcement for Composite Materials: Extraction, Characterization and Weibull Distribution Analysis. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(3), 803-811.
41. Seki, Y., 2018. Hindistan Cevizi Liflerinin Yüzeysel Özelliklerine, Termal Bozunma Davranışlarına ve Yapısal Karakterizasyonuna Oksidatif Modifikasyonun Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 25(111), 189-195.
42. Vijay. R., Lenin, S.D., Vinod, A., Sanjay M.R., Siengchin, S., Jawaid, M., Khan, A., Parameswaranpillai, J., 2019. Characterization of Raw and Alkali Treated New Natural Cellulosic Fibers from *Tridax Procumbens*. *International Journal of Biological Macromolecules* 125, 99-108.
43. Manimaran, P., Senthamaraikannan, P., Sanjay, M.R., Marichelvam, M.K., Jawaid, M., 2018. Study on Characterization of *Furcraea Foetida* New Natural Fiber as Composite Reinforcement for Lightweight Applications. *Carbohydrate Polymers*, 181, 650-658.
44. Ridzuan, M.J.M., Abdul, M.M.S., Afendi, M., Aqmariah Kanafiah, S.N., Zahri, J.M., Gibson A.G., 2016. Characterisation of Natural Cellulosic Fibre from *Pennisetum Purpureum* Stem as Potential Reinforcement of Polymer Composites. *Materials & Design* 89, 839-847.
45. Saravanakumar, S.S., Kumaravel, A., Nagarajan, T., Sudhakar, P., Baskaran. R., 2013. Characterization of a Novel Natural Cellulosic Fiber From *Prosopis Juliflora* Bark. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1928-1933.
46. Baskaran, P.G., Kathiresan. M., Senthamaraikannan. P., Saravanakumar, S.S., 2018. Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from the Bark of *Dichrostachys Cinerea*. *Journal of Natural Fibers*, 15(1), 62-68.
47. Dalmis. R., Kilic, G.B., Seki, Y., Koktas, S., Keskin, O.Y., 2020. Characterization of a Novel Natural Cellulosic Fiber Extracted from the Stem of *Chrysanthemum Morifolium*. *Cellulose*, 27, 8621-8634.
48. Belouadah, Z., Ati, A., Rokbi, M., 2015. Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from *Lygeum Spartum* L. *Carbohydrate Polymers*, 134, 429-437.

## Kuru Derelerde Taşkın Risk Analizi; Kebendibi Deresi Örneği

Gözde ALTIN\*<sup>1</sup> ORCID 0009-0002-7017-878X

Saygın TAŞKIN<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-6388-7786

Recep YURTAL<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-3175-6567

M. Sami AKÖZ<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-0282-0574

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 30.10.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/How to cite: ALTIN, G., TAŞKIN, S., YURTAL, R., AKÖZ, M.S., (2024). Kuru Derelerde Taşkın Risk Analizi; Kebendibi Deresi Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 221-229.

### Öz

Taşkın risk analizi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Taşkın risk analizi üzerine yapılan çalışmalar coğrafi bilgi sistemleri üzerine odaklanmıştır. Taşkın riskinin belirlenmesi genellikle açık kanal hesaplamasına dayanmaktadır. Bu çalışmada Hec-Ras paket programı ile tek boyutlu analiz yapılmıştır. Kebendibi Nehri alt havzasındaki taşkın risk analizinin sonuçları sunulmuştur. Raster veriler Netcad programı kullanılarak Mersin ilinin sayısal haritalarından elde edilmiş ve Hec-Ras programında analiz edilmiştir. Analiz sonuçları taşkın risk haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Netcad, Hec-Ras, Taşkın, CBS, Kebendibi nehri

## Flood Risk Analysis in Dry Streams; Kebendibi Stream Example

### Abstract

A variety of methods are used for flood risk analysis. studies on flood risk analysis have focused on geographic information systems. Determination of flood risk is generally based on open channel calculation. In this study, one dimensional analysis was performed with Hec-Ras package program. The results of flood risk analysis in Kebendibi River sub-basin are presented. Raster data were obtained from the numerical maps of Mersin province by using the Netcad program and analyzed in the Hec-Ras program. The results of the analyses were used to create flood risk maps.

**Keywords:** Leishmania infantum, Momordica charantina, Ytotoxicity, Antileishmanial

### 1. GİRİŞ

Türkiye jeolojik yapısı itibariyle eğimli bir coğrafyaya sahiptir. Meteorolojik olaylar jeolojik

koşullarla bir araya gelerek doğal afete elverişli bir ortam oluşturmaktadır. Taşkın, sel, heyelan, erozyon, çığ, deprem, kuraklık gibi olaylar Türkiye'nin bu fiziki yapısından dolayı yaygın

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Gözde ALTIN, gozdesabanci5@hotmail.com

olarak görülmekte olan doğal afetlerdendir. Afetlerin önlenmesi genellikle mümkün değildir, fakat gerekli önlemler alınarak en az zararlar aşılamak hedeflenmelidir [1].

Akarsulardaki debi değişimleri, su seviyesinin yükselmesine neden olarak taşkın yatağından taşmasına yol açabilir. Bu kontrolsüz su yayılımı, maddi hasarlara, yaralanmalara ve hatta ölümlere sebep olabilir, bu olay genellikle taşkın olarak tanımlanır. [2].

Taşkınlar, dünya genelinde insan hayatını etkileyen aynı zamanda ciddi ekonomik hasara yol açan, sık tekrarlanan ve büyük yıkımlara neden olan doğal tehlikeler arasında yer almaktadır [3].

Ülkemizde son 60 yılda (1955-2014) 2.563 taşkın meydana gelmiş olup 1.500'e yakın can kaybı yaşanmıştır. Mevcut veriler itibari ile taşkınlardan kaynaklanan ekonomik kayıp her yıl yaklaşık 100 milyon \$'dır [4].

Taşkınların potansiyel zararını kesin bir şekilde belirlemek mümkün değildir. Ancak, taşkın debileri

belirlenebilirse, risk analizi yapmak, haritalamak ve modellemek önemlidir. Bu süreç sayesinde, olası etkiler değerlendirilip, alınacak önlemlerin ne düzeyde olması gerektiği belirlenebilir[5,6].

Taşkın sonrası bölgesel zarar araştırılarak, olağan hayatı daha güncel tutarak durumları iyileştirmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmelidir [7,8]. Taşkın ve taşkın alanları üzerine yapılacak detaylı bir çalışma; hidrolojik, hidrolik, topoğrafik ve diğer ilişkili unsurların zaman ve alan boyutunda analizini gerektirir [9].

Sayısal modellerle taşkın yatağı belirleme tekniği taşkınların nerede ve ne kadar bir süre sonra oluşacağını tahmini için kullanılmaktadır. Bu türden bir çalışma için, hidrolojik/hidrolik modeller ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) güçlü bir destek oluşturmaktadır [10].

Oğuz ve arkadaşları, 2016 yılında yaptıkları çalışmada CBS teknikleri ile Artvin ilinin taşkın risk alanları belirlemiştir. Bu alanlarda taşkın olayının sıkça görüldüğü belirtilmiştir [11].



Şekil 1. Çalışma yapılan bölgenin ulaşım haritası

NetCAD de taşkın risk analizi için gerekli verilerin toplanması ve yönetilmesi gibi bazı yardımcı

görevlerde kullanılabilen bir CBS yazılımıdır. Genellikle temel alt yapı tasarımı, şehir planlaması

ve CBS projeleri için NETCAD'den de yararlanır. CBS, çalışmaların düzenli, depolanabilir, görüntüleme kısmında elde etmesi kolay ve analiz işlemlerinin hızlı yapılmasına olanak sağladığı için, son yıllarda kullanımı artmıştır. Bu teknoloji, zamandan tasarruf etmenin yanı sıra yüksek maliyetlerden de kurtulma olanağı sağlar ve güncel veri temininde büyük önem taşır. Taşkın risk analizleri, heyelan analizleri, çığ ve deprem analizleri, havza alanları ve sınırının belirlenmesi, yükseklik veri modellerine dayalı haritaların oluşturulması gibi birçok alanda CBS teknolojilerinin sunduğu imkândan faydalanılabilir [12].

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), taşkın analizi ve taşkın risk analizi için kullanılır. HEC-RAS sayesinde nehirler ve akarsular için hidrolik ve hidrolojik modelleme yapılabilir. CBS teknolojisi gibi, HEC-RAS da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle, su kaynakları yönetimiyle ilgili konularda taşkın analizi ve taşkın risk analizi gibi unsurların önemi büyüktür. HEC-RAS, su akışının nehir yataklarındaki davranışını modelleyebilir, hidrolik hesaplamalar yapabilir ve taşkın suyu yayılımını simüle edebilir. Nehir yatağı geometrisi, hidrolojik veriler, hidrolik özellikler ve diğer parametreler kullanılarak taşkın suyunun yayılımının tahmini için birçok matematiksel model kullanılır.

Yapılan çalışmalarda, taşkın riski yüksek olan bölgelerin genellikle nehir yataklarına yakın alanlar, alçak lying alanlar ve yoğun yağış alan bölgeler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, taşkın riskini artıran faktörler arasında ormansızlaşma, şehirleşme ve arazi kullanımı değişiklikleri gibi insan kaynaklı faktörlerin de olduğu belirlenmiştir [13-16].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

Gözne Mahallesi, Mersin İline bağlı Toroslar ilçesinin mahallesidir. Kuzeyde Ayvagediği, güneyde Darisekisi ve Soğucak ve Batıda Bekiralanı Mahalleleri ile çevrilidir.

Etrafı dağlarla çevrili olan Gözne vadisinin iki yanında kurulmuş bir kasabadır. Batısında Çölek Sırtlandık dağları, kuzeyinde bölgeye Sülüklü ve Ayvagediği bölgeleri, Sülüklü'nün üzerindeki Karatepe Dağları ile çevrilidir. Güneyinde ise kale vardır. Denizden yüksekliği yaklaşık 1150 m civarındadır. Torosların güneyinde dağlık bir bölgedir ve geniş düzlüklere sahip değildir. Arazi engebeli ve taşlıktır. Bu yüzden ekilebilir alanlara sınırlıdır.

Bu sebeple ekilebilir alanlar, Sülüklü, Korum, Çatalağaç ve Şıhbağı bölgeleri ile sınırlıdır.



Şekil 2. Çalışma yapılan bölgenin uydu görüntüsü

### 2.2. Yöntem

Netcad CBS uygulamaları, Coğrafi Bilgi Sistemleri alanındaki temel kavramlar, veri yapıları, veri üretim teknikleri, uzaktan algılama, veri tabanı yönetimi gibi konuları kapsamakta; ayrıca Netcad programının kullanımı ile CBS projesi oluşturma ve CBS analizleri yapma yeteneklerini içermektedir.

Bu çalışmada Havza Taşkın Modelleme modülü kullanılmıştır ve havza analizlerinin oluşturulması, birim hidrograf oluşturulması, ekstrem yağış analizleri ve taşkın pik debilerinin hazırlanmasında Netcad yazılımından yararlanılmıştır. Su yolları ve Havzalar (Tarboton, 1997) tarafından geliştirilen TAUDM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) metodu kullanılarak bulunmuştur [8].

Netcad ile bölgenin üçgen modeli kullanılarak raster veriler elde edilmiştir. Elde edilen raster veri içerisinde yükseklik ve koordinat bilgisi yer almaktadır. Raster veri kullanılarak ana havza ve alt havzalar elde edilmiştir. Suyolları programın Havza Modülü kullanılarak bulunmuştur.

62 yıllık yağış değerleri kullanılarak Netcad yazılımı ile maksimum yağışların ekstrem dağılım hesabı yapılmıştır. Bu istatistiksel hesaplar Normal Dağılım, Log-Normal (2 Parametrel), Log-Normal (3 Para-metrel), Pearson Tip-3, (Gama Tip-3), Log Pearson Tip-3 ve Gumbel Dağılımlarıdır.

Bu dağılımlara Kolmogorov-Simironov testi yapılmıştır. Hesaplar sonucunda bölgeye yağacak yağışlardan dolayı debiler Mockus metoduna göre 2, 5, 10, 25, 50, 100 yıl tekrerrürlü hesaplanmıştır. Hec-Ras yazılımı, kararlı ve kararsız akış hesaplamalarının yanı sıra sediment taşınımı, su sıcaklığı ve su kalitesi modellemeleri yapabilmeye yeteneğine sahiptir [10].

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma yapılan alanda ilk olarak pürüzlülük katsayısı belirlenmelidir.

Bu çalışmada, DSİ tarafından modifiye edilmiş tablolardan yararlanılmıştır. Cowan, pürüzlülük katsayısının hesabı için aşağıdaki yöntemi bulmuştur.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m \quad (1)$$

Burada  $n_0$ ; kanalın zemin özelliklerine göre seçilen pürüzlülük katsayısı,  $n_1$ ; yüzey düzensizliklerinin etkileri için bir düzeltme değeri,  $n_2$ ; kanal enkesiti şekli ve büyüklüğündeki değişimler için seçilen bir katsayı,  $n_3$ ; kanaldaki mevcut engellerin etkisi için seçilen bir katsayı,  $n_4$ ; akım şartları ve bitki örtüsü için seçilen bir katsayı,  $m$ ; ise kanalın kıvrım derecesini ifade eden bir katsayıdır. Bu katsayılar kanalın özelliğine göre Çizelge 1’de sunulmuştur [17].

Şekil 3’te görülen alan bölgenin çok büyük kısmını temsil etmekte olup pürüzlülük katsayısı değeri 0,147 olarak hesap edilmiştir.



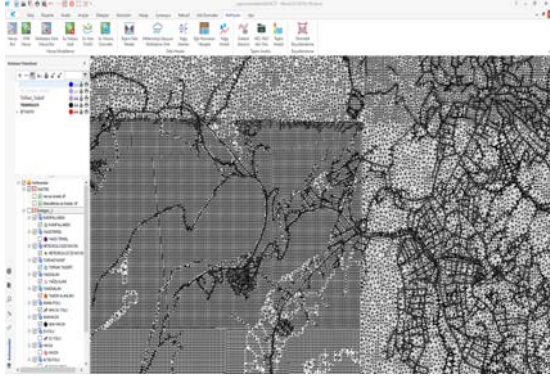
Şekil 3. Çalışma yapılan bölgenin arazi yapısı

Çizelge 1. DSİ tarafından modifiye edilmiş tablo

Yataktaki Malzeme Cinsi	Beton	Ortalama Dane Çapı	$n_0$	0.012-0.018
	Kaya			0.025-0.0032
	Sert Toprak			0.026-0.035
	İri Kum			1-2
	İnce Çakıl			2-64
	Çakıl			64-256
	İri Çakıl			>256
	İri Taş			
Yumru Kaya				0.04-0.07
Kanal Şev Durumu	Pürüzsüz	Beton Duvar	$n_1$	0.000
	Önemsiz	Taş Duvar		0.003
		Istifli Taş Tahkimat		0.005
		Ağaçsız Kaya/Toprak Yamaç		0.008
	Orta	Istifli Taş Tahkimat		0.01
Şiddetli	Ağaçlı Yamaç	0.015		
Kanal kesit değişimi	Aşamalı		$n_2$	0.02
	Ara sıra değişen			0
	Sık Değişen			0.005
Kanaldaki engeller	İhmal edilebilir		$n_3$	0.01-0.015
	Önemsiz			0.02-0.03
	Kayda değer			0.04-0.06
	Şiddetli			0.000
Kanaldaki Bitki Örtüsü	Düşük		$n_4$	0.005-0.01
	Orta			0.01-0.025
	Yüksek			0.025-0.05
	Çok Yüksek			0.05-0.1
Kanal Kıvrımı	Önemsiz	Dere Uzunluğu / Kuş Uçuşu Uzunluk	$m$	1-1.2
	Kayda Değer			1.2-1.5
	Şiddetli			>1.5

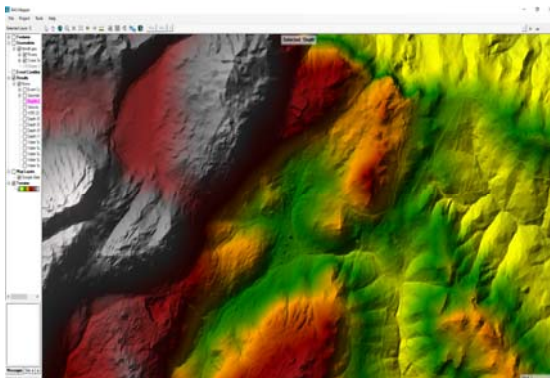
Bu çalışmada münhanilerden elde edilen üçgen model, yazılımlar yardımı ile raster modele dönüştürülmüştür ve raster formatındaki veri işlenerek havza, su yolu, debiler bulunmuş Hec-Ras programı yardımı ile Taşkın risk haritaları oluşturulmuştur.





Şekil 4. Bölgenin modellenmesi için kullanılan üçgen model

Raster modelde haritaların oluşturulabilmesi için Şekil 4’te gösterilen MESKİ (Mersin Su ve Kanalizasyon İdaresi) Genel Müdürlüğü’nden elde edilen üçgen model kullanılmıştır. Tüm dönüştürme işlemlerinden önce çalışmanın projeksiyonu seçilen üçgen modelin projeksiyonu olan ITRF-96 36-30 seçilmiştir. Üçgen modelden raster veri üretmek için Analiz menüsü yükseklik modülü kullanılmaktadır. Üretilen raster görüntü tif formatındadır. Piksel büyüklüğü metrik sisteme göre belirlenir. Raster harita elde etme işleminin uzunluğu piksel büyüklüğünün boyutuna göre değişiklik göstermektedir. Raster veri oluşturma işlemi vektörel verilerin piksellere dönüştürülmesidir. Şekil 5’te Raster görüntünün TIN (Triangular Irregular Network-Üçgenlenmiş Düzensiz Ağ) formatındaki görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5. Üçgen modelden elde edilen yükseklik modeli (Hec-Ras)



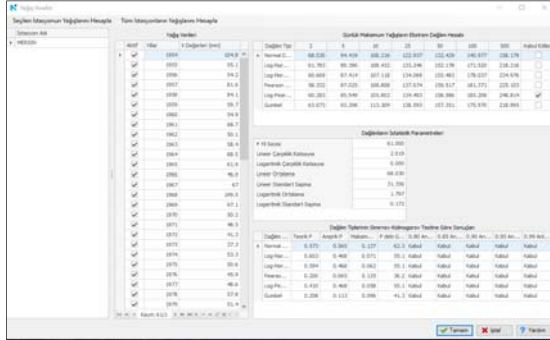
Şekil 6. Çalışma alanını kapsayan Havzanın bulunması (Netcad)

Kebendibi Deresi'nin kuru olması sebebiyle, taşkın debi hesaplarının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle yağış verileri temel alınarak maksimum yağışların ekstrem dağılım hesabı yapılmıştır.

Taşkın frekans analizleri, çeşitli olasılık dağılımları kullanılarak Netcad programı yardımı ile yapılmıştır. Şekil 7’de sunulduğu gibi “Analiz” sekmesinden “Taşkın Debi Hesabı” bölümündeki “Yağış Analizi” komutundan Mersin Meteoroloji İstasyonu seçilmiştir. Bu kısımda yağış verileri Netcad yazılımı tarafından veri tabanından alınır ya da el ile hesaplanır.

Bu çalışmadaki veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü Mersin Şube Müdürlüğünden alınmıştır. Yazılımın hesapladığı olasılık dağılımları; Normal Dağılım, Log-Normal (2 Parametrel), Log-Normal (3 Parametrel), Pearson Tip-3, (Gama Tip-3), Log Pearson Tip-3 ve Gumbel dağılımlarıdır. Bu dağılımlardaki en ekstrem durumu içeren Log Pearson Tip-3 kabul edilmiştir.

Debinin hesaplanabilmesi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu Yöntemlerden bazıları Rasyonel yöntem, Mockus yöntemi, DSİ-Sentetik (SCS) ve Snyder yöntemleridir.



**Şekil 7.** Mersin Meteoroloji İstasyonu verilerine göre maksimum yağış ekstrem dağılımların bulunması (Netcad)

Kebendibi Deresi havza alanı 5392 km<sup>2</sup> bulunmuştur. Havza drenaj alanı 1-10 kilometre arasında olduğu için Mockus Yöntemi tercih edilmiştir (Netcad, 2020).

**Çizelge 2.** Mockus yöntemi ile debilerin belirlenmesi

ENII =	82.000	Drenaj alanının 24 saatlik yağış yinelenme değerleri					
S =	55.756	2	5	10	25	50	100
0,2S =	11.151	60.283	85.949	105.802	134.493	158.586	185.208
0,8S =	44.605	53.911	76.864	94.619	120.278	141.825	165.632
$h_{akış} = (P - 0,2S) / (P + 0)$		18.560	35.550	50.041	72.225	91.592	113.512
Q <sub>P</sub> =	1.377	25.548	48.936	68.884	99.421	126.081	156.254
K <sub>1</sub> =	0.208						
Q <sub>D</sub> =	1.079	20.0	38.3	54.0	77.9	98.8	122.4
K <sub>2</sub> =	0.163						
UYGULANAN YÖNTEM		T[saat]	%	MF	YADK	PLV	SON ÇARPIMI
Mockus		2.00	1	1.130	0.989	0.800	0.894
Q500 m <sup>3</sup> /s	216.715	AKIŞ HESAPLARI					
Q1000 m <sup>3</sup> /s	242.751	$S = (1000 / ENII) - 10 * 25,4$ Debilerin Belirlenmesi					

Toplanma zamanı (sa) Eşitlik 2 ile ifade edilmiş olup L Akış kolunun boyu (km), S harmonik eğimdir.

$$T_c = 0.00032(L^{0.77}/S^{0.385}) \quad (2)$$

Yağış Süresi D Eşitlik 3 ile ifade edilir.

$$D = 2\sqrt{T_c} \quad (3)$$

Hidrografın yükselme zamanı T<sub>p</sub> Eşitlik 4 ile gösterilmiştir.

$$T_p = 0.5D + 0.6T_c \quad (4)$$

Suların Alçalma zamanı T<sub>r</sub> Eşitlik 5 ile ifade edilir.

$$T_r = 1.67T_{pc} \quad (5)$$

T<sub>s</sub> ise taşkın süresini ifade etmekte olup Eşitlik 6 ile gösterilmiştir.

$$T_s = T_p + T_r \quad (6)$$

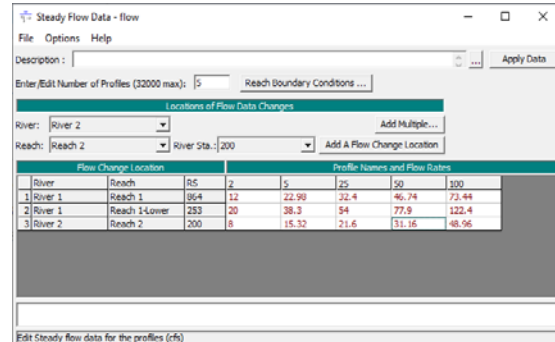
Bu eşitlikler birim hidrografın oluşturulmasını sağlayacak olup sonucunda birim hidrografın pik debisi Eşitlik 7 ile ifade edilir.

$$Q_p = (K \times A \times h_a) / T_p \quad (7)$$

Burada Q<sub>p</sub> taşkın hidrografının pik debisi (m<sup>3</sup>/s), A havza alanı (km<sup>2</sup>), K iklim parametresidir ve 0,208 olarak alınmaktadır.

**Çizelge 3.** Mockus yöntemi ile debilerin belirlenmesi

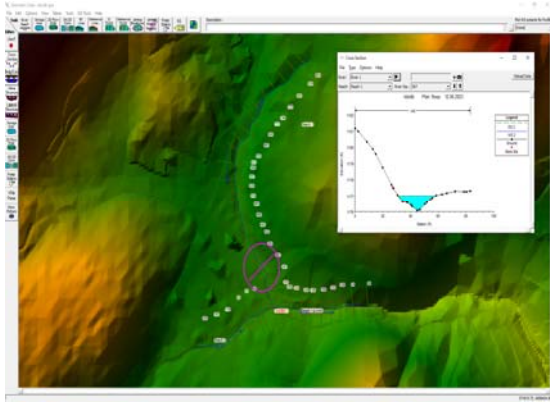
MOCKUS	
(T <sub>c</sub> ) Toplanma Süresi	0,359
(D) Yağış Süresi	1,199
(T <sub>p</sub> ) Hidrografın yükselme zamanı	0,815
(T <sub>r</sub> ) Hidrografın Alçalma Süresi	1,361
(T <sub>p</sub> ) Yağış Süresi	2,175
(Q <sub>p</sub> ) Pik Debi (m <sup>3</sup> /mm/sn)	1,377



**Şekil 8.** Hec-Ras ile pik debilerin girilmesi

Netcad yazılımıyla bulunan tekerrür debileri Çizelge 3’de verilmiştir. Bu debiler “Steady Flow Data” sekmesi açılıp girilecek debi sayısı girilmiş ve profil isimleri simülasyon sonucunu daha iyi değerlendirebilmek için değiştirilmiştir.

Daha sonra sınır koşulları “Reach Boundary Conditions” sekmesi açılarak normal derinlik ve kritik altı akım hesabı için gerekli eğim şartı Şekil 9’da gösterildiği gibi girilmiştir. Pürüzlülük katsayısı değerinin tanımlanması için “Edit/View Geometry” sekmesi açılıp Manning katsayısı girilmiştir. Üniform analiz yapılması için gerekli tüm verilerin girilmesinin ardından üniform akım analiz penceresinde “Subcritical” (kritik altı) ile taşkın riski olan bölgelerin belirlenebilmesi, harita üzerinde gösterilmesi için “Floodplain Mapping” (Taşkın Risk Haritası) seçilmiştir. “Compute” butonuna tıkladığında analiz ve simülasyon için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 9. Hec-Ras il en kesitlerin çizilmesi ve debilere göre kesit doluluk oranlarının gözlenmesi.

Debi hesabının yapılmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu Yöntemlerden bazıları Rasyonel yöntem, Mockus yöntemi, DSI-Sentetik (SCS) ve Snyder yöntemleridir. Kebendibi Deresi havza alanı 5392 km<sup>2</sup> bulunmuştur. Havza drenaj alanı 1-10 kilometre arasında olduğu için Mockus Yöntemi tercih edilmiştir (Netcad, 2020). Bu çalışmada Ras Mapper sekmesi aracılığıyla akış kolları, kıyı çizgileri, taşkın sınırları ve en kesitler geometrik bilgi (geometry data) olarak tanımlanmış olup önceki bölümlerde yapılan debi hesapları sonucunda oluşan veriler üniform akım (steady flow data) bilgisi olarak girilip üniform akım analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucu “Ras Mapper” sekmesinde, taşkın haritası oluşturularak gösterilmiştir. Sonuçlar görüntüleme elemanları yardımı ile en kesitler üzerinde gösterilmiştir.

Çalışmada Gözne, Kebendibi Deresi'nin mansap tarafında suyun boşalabileceği bir yapı olmadığı kabul edilmiştir. Riskli durumun şehirleşen tarafta olduğu düşünüldüğünden ve akış yolu üzerinde bulunan menfezler ve beton borular tıkanmış ya da yıkılmış durumda olduğundan herhangi bir sanat yapısı yapılmamıştır.

Kebendibi, herhangi bir gözlem istasyonu olmadığı ve kuru bir dere olduğu için hesaplamalar yapılırken bölgenin yağış verileri ve havza özellikleri kullanılarak debilere Mersin Meteoroloji Şube Müdürlüğünden alınan yağış verileri doğrultusunda çalışma girdileri Netcad yazılımı yardımı ile analiz edilmiş ve debiler hesaplanmıştır.

Program hesaplarını en uzun ve sürekli su yolu üzerinden gerçekleştirmektedir. Mersin İli sınırları içerisinde yer alan çalışma alanı, havza içerisinde yer alan otoyol ile bölünmektedir. Bu durum havza hesapları yapılırken diğer CBS tabanlı yazılımların çoğunda havzanın bölünmesine sebep olmaktadır. Netcad programında havza bulunurken kullanılan yöntem ile havza tek parça olarak hesaplanmıştır.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA



Şekil 10. Ras Mapper kullanılarak Hec-Ras'tan elde edilen akış hızlarının alan bazında dağılımı.

Çalışmada, Q<sub>2</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>10</sub>, Q<sub>20</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>100</sub> debileri için analiz gerçekleştirilmiştir. Hec-Ras programı debi değerlerini girilen kesit özelliklerine bağlı olarak çizilen her bir kesite göre yerleştirilmiştir. Ras Mapper bu debi değerini kesite alansal olarak

dağıtmaktadır. En düşük kotlu alanlar su altında kalmakta yüksek kotlu alanlar taşana kadar dolmaya devam etmektedir. Görselde görülen alanda herhangi bir su geçiş yolu bulunmamaktadır. Bu durumda suyun doyma noktasına ulaştığı ve akışa geçtiği varsayımı ile 50 yıllık debiye ulaşıncaya kadar su altında kalmaktadır. Yolların ve çeşitli engellerin olması, bu bölgelerde yerleşim yerleri olmaması taşkın öteleyici yapı görevi görmektedir. Çözüm ise bu durum göz önüne alınmadan yapılmıştır. Eğer böyle bir durumun simülasyonu oluşturulmak istenilirse “Edit Geometry” sekmesinden “Storage Area” tanımı yapılması gerekmektedir. Taşkın haritalarından anlaşılacağı üzere debi tekrür yılı fark etmeden ani yağışlarda, derenin mansaplandığı bölgede deşarj yapısı yoksa şehirleşmenin yoğun olduğu kısımda taşkın riski bulunmaktadır.

Günümüzde yaşanan taşkınlar genellikle doğa olayı olarak değil de plansız kentleşme sonucu ortaya çıkmaktadır. Zaman içinde meydana gelen taşkınlar can ve mal kaybına sebep olmuşlardır. Mersin’de meydana gelen taşkınlar Ani taşkın olarak tanımlanmakla birlikte bu taşkınların konvektif yerel yağışlardan dolayı önceden tahmin edilmesi zordur. İnsan yaşamını en çok tehdit eden taşkın türü de konvektif ani yağışların meydana getirdiği taşkınlardır. Her ne kadar istatistiksel olarak büyük felaketler sınıfı içerisinde yer almasa da her yıl yol açtığı can kaybı ciddi miktarda olup, yüksek hızı ve rüsubat taşıması nedeniyle de ciddi maddi hasarlara da yol açmaktadır.

Ülkemizin coğrafi koşullarının karmaşık bir yapıya sahip olması ve bazı bölgelerde düzensiz yağış dağılımı nedeniyle meydana gelen taşkınlar büyük miktarda hasara yol açmaktadır. Mersin İli genelinde Toros dağlarında toplanan yağış, denizlere dereler yoluyla ulaşmaktadır. Zamanla artan düzensiz ve plansız kentleşmenin etkisi ile kurumuş dere yataklarının mansaplandığı bölgeler kapanmıştır. Kebendibi Deresinin bulunduğu bölgenin kentleşme sebebi ile herhangi bir deşarj noktası bulunmamaktaydı. Program içerisinde yapılan analizlerde herhangi bir deşarj tanımlaması yapılmadan gerçekleştirilmiş olup, gösterilen taşkın risk haritaları, dere yolunun tıkanmış olma durumu için oluşturulmuştur.

Bölgede yapılan tarım nedeni ile su akışı beraberinde irili ufaklı malzemeler akışa dahil olmakta ve taşkın tahribatını artırmaktadır. Dere yatağı boyunca ıslah çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerektiği açıkça görülebilmektedir. Kapalı, bakımsız ve kesitleri yetersiz olan geçişler yeterli kesitlere sahip menfez veya beton borularla yenilenmelidir.

Dere yatağı üzerinde bulunan ve tarım için kullanılan alanların sınırları belirlenmeli taşkın yatağı boyunca yapılacak yapıların önüne geçilmelidir.

Derenin mansaplandığı bölgeye yapılan menfez mevcutta bulunan yağmursuyu hatlarına bağlı olduğundan yüksek debili tekrür yıllarındaki taşkın debilerini karşılayabilmesi için hattın tek bir hat boyunca deniz kıyı çizgisine kadar uzatılması önerilmektedir.

Mersin, Türkiye'nin güney sahilinde bulunan ve Akdeniz'e kıyısı olan bir ilimizdir. Bulunduğu coğrafya nedeniyle Mersin ilinde zaman zaman şiddetli yağışlar ve taşkınlar meydana gelir. Bu nedenle, taşkınlarla mücadele için çeşitli önlemler alınması gerekmektedir.

Mersin'de taşkınları önlemek amacıyla hayata geçirilen projeler ve yapılar bulunmaktadır. Ancak, bu projelerin yanı sıra halkın da taşkınlarla ilgili farkındalık kazanması önemlidir. Vatandaşların taşkınlara karşı alabilecekleri önlemler hakkında bilinçlenmeleri ve acil durum planları oluşturmaları gerekmektedir. Taşkın riski iklim ve hava koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği için, sürekli olarak yeni projeler ve düzenlemeler yapılmalıdır. Bu sayede taşkınların neden olduğu zararlar en aza indirilerek insanların ve yerleşim yerlerinin güvenliği sağlanabilir.

## **5. KAYNAKLAR**

1. Yaylak, M.M., 2016. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Yardımıyla Bitlis Deresi Taşkın Risk Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis, 93.

2. Beyazıt, M., Önöz, B., 2008. Taşkın ve Kuraklık Hidrolojisi. Ankara: Nobel Basımevi, 259.
3. Khan, S.I., Hong, Y., Wang, J., Yılmaz, K.K., Gourley, J.J., Adler, R.F., Irwin, D., 2010. Satellite Remote Sensing and Hydrologic Modeling for Flood Inundation Mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(1), 85-95.
4. Tokgözlü, A., Özkan, E., 2018. Taşkın Risk Haritalarında AHP Yönteminin Uygulanması: Aksu Çayı Havzası Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, 44, 151-176.
5. De Moel, H.D., Van Alphen, J., Aerts, J.C. 2009. Flood Maps in Europe-Methods, Availability and use. Natural Hazards and Earth System Sciences, 9(2), 289-301.
6. Grünthal, G., Thieken, A.H., Schwarz, J., Radtke, K.S., Smolka, A., Merz, B., 2006. Comparative Risk Assessments for the City of Cologne-Storms, Floods, Earthquakes. Natural Hazards, 38, 21-44.
7. Geyikli, M.S., 2015. Taşkın Risk Haritalarının CBS Yazılımları Yardımıyla Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 75.
8. Shirzad, M.R., 2017, Taşkın Riskinin Uzaktan Algılama ve CBS Teknolojileri ile Değerlendirilmesi: Kocaeli Maden Deresi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 50.
9. Demir, V., Keskin, A.Ü., 2022. Yeterince Akım Ölçümü Olmayan Nehirlerde Taşkın Debrisinin Hesaplanması ve Taşkın Modellemesi (Samsun, Mert Irmağı Örneği). Geomatik, 7(2), 149-162.
10. Onuşluel Gül, G., Gül A., 2010. İzmir Bostanlı Havzası İçin Taşkın Alanlarının Hec-HMS ve Hec-RAS Modelleri ile Belirlenmesi. II. Ulusal Taşkın Sempozyumu, 267-274, Afyonkarahisar.
11. Oğuz, K., Oğuz, E., Coşkun, M., 2016. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Taşkın Risk Alanlarının Belirlenmesi: Artvin İli Örneği, IV. Ulusal Taşkın Sempozyumu, 793-803, Rize.
12. Şen, T., 2019. Atatürk Baraj Bendinin Yıkılmasıyla Oluşacak Taşkın ve Etkilerinin CBS Yardımıyla İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101.
13. Aydın, M.E., Kılıç, M.S., Aksoy, A.T., 2013. Taşkın Risk Haritalarının CBS Yazılımları Yardımıyla Belirlenmesi. Harita Tekniği Dergisi, 29(107), 11-20.
14. Özdemir, A.G., Aksoy, A.I., Kılıç, M.S., 2016. Doğal Afet Risk Analizinde NATCAD ve CBS Kullanımı: Van Gölü Havzası Örneği. Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, 13(25), 23-40.
15. Aydın, M.E., Kılıç, M.S., Aksoy, A.T., 2014. CBS ve HEC-HMS Kullanarak Taşkın Risk Analizi: Gediz Nehri Havzası Örneği. 3. Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 22-25 Ekim 2014, Ankara, Türkiye.
16. Aydın, M.E., Kılıç, M.S., Aksoy, A.T., 2017. Taşkın Risk Analizinde CBS ve HEC-RAS Kullanımı: Seyhan Nehri Havzası Örneği. 5. Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 19-22 Ekim 2017, İzmir, Türkiye.
17. Bulu, A., Yılmaz, E., 2002. Serbest Yüzeyle Akımlarda Pürüzlülük Katsayısının Belirlenmesi. Türkiye Mühendislik Haberleri, 420, 421-423.
18. Arcement, V.R., Schneider, G.J., 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 2339.
19. Tarboton, D., 1997. TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models). <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/documentation.html>.
20. Netcad, 2020. [www.wiki.netcad.com.tr](http://www.wiki.netcad.com.tr) <https://wiki.netcad.com.tr>
21. MGM, 2020. Meteoroloji Genel Müdürlüğü; Analizler. [www.mgm.gov.tr](http://www.mgm.gov.tr)
22. Hec-Ras, 2020. River Analysis System, Applications Guide, Version 6.0 Beta. U.S Army Corps of Engineers. [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)
23. DSİ, 2015. Dere Yatakları İçin Pürüzlülük Katsayısı Belirleme Kılavuzu. Ankara.



## Gender Classification through Fusion of Holistic and Region-based Facial Patterns

Maryam ESKANDARI (Meryem ŞEERİFİ)\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-0887-3060

<sup>1</sup>Toros University, Engineering Faculty, Department of Software Engineering, Mersin, Türkiye

Geliş tarihi: 25.09.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ESKANDARI, M., (2024). Gender Classification through Fusion of Holistic and Region-based Facial Patterns. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 231-238.

### Abstract

In this study, a robust gender prediction system is proposed to fuse global and regional facial representations through score and feature level fusion. In order to extract facial features for gender classification, Binarized Statistical Image Features (BSIF) approach is applied on holistic and regional features of face images. The extracted features are then concatenated to combine the region-based information at feature level fusion. Then the optimized sub-set of features is selected using Particle Swarm Optimization (PSO) method. Finally, the holistic and regional features are combined at score level fusion to produce the final set of scores for gender classification. This study applies Weighted Sum (WS) rule strategy for score level fusion. The experimental results are performed on Multiple Biometric Grand Challenge (MBGC) and CASIA-Iris-Distance databases with consideration of subject-disjoint training and testing evaluation to testify the validity of the proposed gender classification system. The experimental results of the study demonstrate the success of the proposed scheme for gender prediction.

**Keywords:** Gender classification, Region-based BSIF, Information fusion, Optimized feature selection

### Bütünsel ve Bölge Bazlı Yüz Kalıplarının Birleştirilmesi Yoluyla Cinsiyet Sınıflandırması

#### Öz

Bu çalışmada, evrensel ve bölgesel yüz görünüşlerini skor seviyesi birleştirme ve öznelik seviyesi birleştirme yoluyla bir araya getirmek için güçlü bir cinsiyet tahmin sistemi önerilmektedir. Cinsiyet sınıflandırmasında yüz özneliklerini çıkarmak için, İkili İstatistiksel Görüntü Öznelikleri (BSIF) yaklaşımı yüz görüntülerine bütünsel ve bölgesel olarak uygulanmıştır. Ardından çıkarılan öznelikler bölgesel bilgilerin öznelik seviyesi birleştirilmesi düzeyinde bir araya getirilir, Optimize edilmiş öznelik alt kümesi, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemi kullanılarak seçilir. Son olarak, bütünsel ve bölgesel bilgiler, cinsiyet sınıflandırması için nihai skorları üretmek amacıyla skor seviyesi birleştirme seviyesinde bir araya getirilir. Bu çalışma, skor seviyesi birleştirme için Ağırlıklı Toplam (WS) kuralı stratejisini kullanmaktadır. Deneysel sonuçlar, önerilen cinsiyet sınıflandırma sisteminin geçerliliğini test etmek amacıyla Multiple Biometric Grand Challenge (MBGC) ve CASIA-Iris-Distance veritabanlarında,

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Maryam ESKANDARI, [maryam.eskandari@toros.edu.tr](mailto:maryam.eskandari@toros.edu.tr)

özne-ayrık eğitim ve test değerlendirmesi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel sonuçları cinsiyet tahmin sisteminin başarılı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cinsiyet sınıflandırması, Bölgesel BSIF, Bilgi kaynaşımı, Optimize edilmiş öznetelik seçimi

## 1. INTRODUCTION

Gender classification plays an important role in several face application scenarios such as surveillance, human computer interaction, content-based searching and indexing. In general, different biometric traits are used to predict the gender of individuals [1-10]. The focus of this study is on gender classification using facial information in images. In fact, fusion of holistic and regions of facial information first at feature level fusion and then at score level fusion produces the optimized proper information to estimate the gender of individuals.

Several studies investigate the performance of different biometric characteristics on gender classification using different methods and classifiers. The authors of [1] estimate the gender of individuals by computing the facial embedding of faces based on a neural network system. The focus of [2] for predicting gender from face images is on extracting the geometric features including distance between eyebrow to eye, eyebrow to nose top, nose top to mouth, eye to mouth, left eye to right eye, width of nose, width of mouth. The extracted features are then classified using an artificial neural network. In [3], the classification of gender is performed using the Multiscale facial fusion feature method. The extraction of features for fusion is done using Local Binary Pattern (LBP) and Local Phase Quantization (LPQ) feature extractors and Support Vector Machine (SVM) employed for the purpose of classification. Gender classification based on iris features is proposed in [4] using an SVM classifier. In addition, the authors employ Principal Component Analysis (PCA) to reduce the dimension of feature vectors. In [5], prediction of gender through palm print biometric is performed using convolutional neural network (CNN) architecture. The work outperforms the gender classification of subjects through palm print by using a two-stage method to fine-tune the VGGNet.

The classification of gender using fingerprint biometric is proposed in [6] using a fusion of LBP and LPQ feature extractors and SVM classifier. The focus of [7] is on face-ocular multimodal biometric systems for a person gender prediction. The authors utilize Uniform Local Binary Pattern (ULBP) descriptor to extract the features of modalities. They applied a Backtracking Search algorithm (BSA) and SVM classifier to predict the gender of individuals based on the optimized feature sets of modalities. Prediction of gender using pattern information of frontal and dorsal hand images is introduced in [8]. The authors of this study classify the hand images using CNN. The gender classification for hand back skin texture (HBST) is done in [9] using sparse representation (SR) technique and nearest neighbor classifier. The concentration of [10] for person gender classification is on a multimodal biometric system involving face, iris, and fingerprint traits. The authors predict gender by extracting the deep features based on AlexNet structure. In [11], the authors implement a model to combine handcrafted features with CNN to overcome challenges such as illumination, pose variations and the necessity of voluminous training sets. Proposing two convolutional neural networks using the central difference convolution layer and the vanilla convolution layer is considered in [12] to predict gender of face images. The authors of [13] introduce a CNN-based approach for gender classification of face images to construct the feature images first using raw patterns to represent a set of salient features for a CNN-based network as input to extract more salient features. Finally, the fused extracted salient features are given to SVM for gender classification.

The current work aims to implement a method based on the fusion of holistic and regions of facial patterns through score and feature level fusion. The facial features for the prediction of gender are extracted using Binarized Statistical Image feature (BSIF) [14] method on holistic and regions of face



images. The extracted features then are concatenated to combine the region-based information at feature level fusion. In order to select the optimized sub-set of features for further classification this study utilizes Particle Swarm Optimization (PSO) [15] method. Finally, the fusion of holistic and regions of faces is performed at score level fusion to generate the final set of scores for gender classification. This study applies Weighted Sum (WS) rule strategy for score level fusion. In order to validate the robustness of the proposed scheme, the experimental results are performed on Multiple Biometric Grand Challenge (MBGC) [16] and CASIA-Iris-Distance [17] face databases with consideration of subject-disjoint training and testing evaluation for gender classification. The contribution of this study is therefore to implement a robust gender classification system based on the face biometrics of individuals which is able to present more remarkable facial information in high security scenarios to represent the subjects' gender of unrecognized attempts. Additionally, marketing research applications can use the proposed gender prediction system to offer their products based on the gender of persons which is provided by the system.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 goes into details of the BSIF feature extraction method for face biometric; Section 3 describes PSO feature selection technique to select an optimized subset of features. The explanation of the proposed gender prediction scheme is done in Section 4. A description of databases, assessment protocols and experimental results is in Section 5. Finally, Section 6 draws some conclusions.

## 2. FACIAL FEATURE EXTRACTION FOR GENDER PREDICTION

In order to extract the facial features to classify the gender of subjects, this study employs Binarized Statistical Image feature (BSIF) technique. BSIF method was introduced by Kannala and Rahtu [14] as a texture-based feature extractor technique. The idea behind BSIF method is to use concepts implemented in Local Binary Patterns (LBP) and

Local Phase Quantization (LPQ) approaches. In fact, both approaches are considered as statistics of labels calculated in the local pixel neighbourhoods via filtering and quantization. Additionally, BSIF method aims to automatically learn a fixed set of filters using a small set of images in place of using hand-crafted filters. This texture-based feature extractor characterizes the texture properties within sub-regions using the code values of pixels histograms. The bit values of BSIF binary code string are calculated by binarizing the response of a linear filter using a threshold at zero. The base of BSIF method is on introducing an image patch  $X$  of size  $l \times l$  pixels with considering a linear filter of the same size as  $W_i$ . Consequently, the calculation of filter response is done according to the equation (1).

$$s_i = \sum W_i(u, v)X(u, v) = w_i^T x \quad (1)$$

where  $w$  and  $x$  are vectors involving pixels of  $W_i$  and  $X$ . Therefore, the binarized feature  $b_i$  extracted using BSIF is calculated by assigning  $b_i = 1$  if  $s_i > 0$  and  $b_i = 0$  otherwise. In this algorithm, learning the filters  $W_i$  is done using Independent Component Analysis (ICA) by maximizing the statistical independence of  $s_i$  [18].

## 3. OPTIMIZED FEATURE SELECTION USING PSO

This study attempts to overcome the problem of high dimensionality for feature level fusion part of the proposed method and consequently selecting the optimized subset of feature sets by applying Particle Swarm Optimization (PSO) approach on concatenated facial features. PSO is introduced by Kennedy and Eberhart [15] concentrating on learning optimized solutions in a search space. The algorithm is initialized using a population of random solutions, called particles, and evaluated using a fitness function. Every particle in this algorithm can be seen as a point in an  $n$ -dimensional feature space and the  $i$ th particle is shown as  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ . PSO memorizes the two best values of each iteration called  $pbest$  and  $gbest$ . The algorithm records the position of best fitness value

for each particle using pbest as  $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ ,  $p$  is the population size. The best particle index among all particles of the population is represented by gbest. Additionally, the velocity of  $i$ th particle of PSO algorithm is considered as  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ . The particle's new velocity is therefore computed according to their previous velocity, distances of its current position from its own best position and groups best experience. The procedure of updating particles is demonstrated in equations (2), (3) and (4).

$$v_i = wv_i + c1 \times rand1() (P_i - x_i) + c2 \times rand2() (gbest - x_i), \quad (2)$$

$$x_i = x_i + v_i, \quad (3)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{1 + e^{-v_i}} \\ 0, & \text{if otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

In the above equations,  $w$ ,  $c1$  and  $c2$  stand for inertia weight and acceleration constants while  $rand1()$ ,  $rand2()$ , and  $rand3()$  are separate random numbers respectively. The value of  $w$ ,  $c1$  and  $c2$  in this study is set as 16, 1 and 2 respectively as introduced in the original PSO. In addition, the concentration of fitness function of this study to select the optimized feature sets is on maximizing the classification rate. Selection of optimized feature sets in this study is performed using binary PSO with consideration of bit strings of length  $M$  consisting of "0" and "1", where  $M$  represents number of features. The bit string "1" means the feature selected while 0 means not selected. This study sets the population and iteration size of the binary PSO feature selection method as 20 and 30 experimentally.

#### 4. PROPOSED GENDER PREDICTION SCHEME

The focus of this section is on introducing a pipeline to increase the gender classification rate of individuals and consequently improve the performance and security of the face recognition systems. The proposed gender prediction scheme explores the sub-regions of face images and then combines with the holistic information extracted

from images. The block diagram of the proposed scheme is depicted in Fig 1. The extraction of ROI of face images to predict the gender in this study considers two scenarios. The first scenario includes four sub-regions as left periorcular region, right periorcular region, nose, and mouth regions.

In the second scenario, the face image is divided into three vertical parts as upper, middle, and lower to provide enough information for gender prediction of subjects. BSFI feature extractor is employed on all extracted regions and entire face separately, the extracted features therefore are fused at feature level fusion. The most relevant and optimized subset of features are selected using the PSO algorithm to improve the performance of the system. In the next step of the proposed method, the matching scores of entire face, ROI regions and vertical parts are combined using Weighted Sum Rule (WS) technique at score level fusion. The fusion is performed based on the WS strategy to combine several matchers by applying sum of their relevant matching scores according to weight values as indicated in equation (5).

$$WS = \sum_{i=1}^N W_i S_i \quad (5)$$

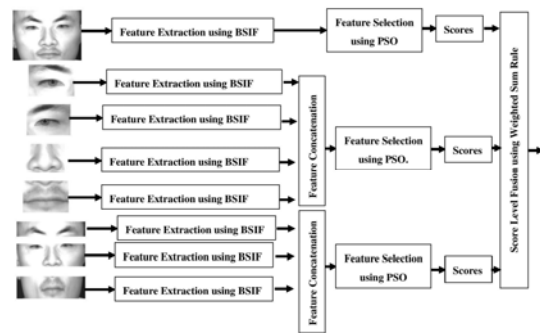


Figure 1. Block diagram of the proposed method

where  $N$  is number of matchers,  $W_i$  is weights corresponding to matchers and  $S_i$  is matching scores. In order to compute the weights, this study considers user-specific method of weight computation [19] on a reference database. In addition, Manhattan distance measurement is employed in this study to produce the matching

scores. In general, the proposed scheme attempts to combine several facial parts using feature and score level fusion strategies to study the effect of holistic and part-based information of faces on gender prediction of subjects.

## 5. DATABASES AND EXPERIMENTAL RESULTS

In order to validate the robustness of the proposed scheme, this section concentrates on the performed experiments of MBGC and CASIA-Iris-Distance databases with consideration of subject-disjoint training and testing evaluation. In general, MBGC database consists of images of 135 individuals under unconstrained conditions and using three challenge problems. The construction of database to perform the experiments is done using 75 males and 60 females to contain whole face, left periocular region, right periocular region, nose region, mouth region, upper partition, middle partition, and lower partition of each subject. The database therefore involves 1080 images in total. On the other hand, CASIA-Iris-Distance database images provide suitable information of both dual-eye iris and face patterns of subjects, the total number of images in this database is 2567 images of 142 individuals captured by a high-resolution camera at-a-distance of ~3 m. This study considers 100 individuals of CASIA-Iris-Distance database including 50 males and 50 females. In total, in order to construct the dataset for experiments, 800 images of this database with consideration of only one image of each subject (face, corresponding ROI and partitions) are selected. This study divides the images into two random parts as training and testing. In general, 50% of males and females are assigned to training and 50% to testing sets. The division to training and testing is done five times, and the last result is reported as average of five runs.

The first set of experiments is conducted to study the effect of holistic, region-based and partition-based facial patterns on gender prediction as represented in Table 1. The highest classification rate belongs to the proposed method for CASIA-Iris-Distance and MBGC databases as 90.12% and 94.11% respectively. The experiments for region-based and partition-based facial representations are

performed with and without consideration of the entire face. The investigation of results shows that combining holistic information of individuals with region/partition-based patterns can improve the gender classification as reported in Table 1. In fact, involving the entire face when left periocular region, right periocular region, nose, and mouth regions are used improves 4.57% and 4.79% classification rate for CASIA-Iris-Distance and MBGC databases respectively compare to the using only entire face for gender prediction. Additionally, fusion of upper, middle, and lower part of the image with the entire face outperforms the gender prediction rate up to 2.45% and 3.29% as demonstrated in the table for CASIA-Iris-Distance and MBGC databases respectively. Therefore, according to the experimental results reported in Table 1, it can be stated that fusion of entire face and ROI's is effective for gender prediction of facial features.

It should be stated that, Manhattan distance measurement is employed to produce the matching scores and WS fusion strategy is used to combine region/partition-based facial patterns with and without the entire face in this study as mentioned before. In addition, the second set of experiments in Table 2 concentrates on the effect of selecting optimized features on gender classification. The experiments of Table 2 therefore, repeat the same experiments at feature level fusion with and without PSO. As reported in the table, the best gender classification rate belongs to the proposed scheme as 90.12% and 94.11% for CASIA-Iris-Distance and MBGC databases respectively when PSO feature selection method is employed. Additionally, all the experiments of both databases have improvement on gender prediction results when PSO feature selection is applied. In fact, investigation of the results demonstrates the effectiveness of optimized feature selection of the study using PSO which has improvement of 3.83% and 4.83% over the experiments without PSO feature selection strategy for the proposed method on CASIA-Iris-Distance and MBGC databases respectively. The improvement of the classification rate using PSO can be seen for other implemented methods as depicted in Table 2. On the other hand, in order to demonstrate the robustness of the

proposed method Table 3 presents a comparison with the state-of-the-art gender classification methods on CASIA-Iris-Distance dataset. The comparison of the results of Table 3 shows the success of the proposed method over other handcrafted methods implemented in this study. Although the method implemented based on the

Convolutional Neural Network (CNN) has the highest classification rate, the improvement compared to the result obtained using the proposed method is not so considerable as reported in the Table. It should be stated that, all the implemented state-of-the-art methods have been applied on entire face images used in this study.

**Table 1.** Gender classification rate of holistic, region-based and partition-based facial patterns using score level fusion (%)

	CASIA-Iris-Distance			MBGC		
	Male (%)	Female (%)	Overall prediction (%)	Male (%)	Female (%)	Overall prediction (%)
Entire Face	85.00	81.00	83.05±1.06	90.28	85.12	87.71 ± 0.45
L-periocular + R-periocular + Nose + Mouth	86.00	84.25	85.12± 0.91	90.50	87.40	88.95 ± 0.37
Upper + Middle + Lower	85.00	81.00	83.00±0.88	88.38	84.67	86.52 ± 1.20
Entire Face + L-periocular + R-periocular + Nose + Mouth	90.25	85.00	87.62±0.39	95.70	89.31	92.50 ± 0.22
Entire Face + Upper + Middle + Lower	87.00	84.00	85.50±1.14	93.00	90.00	91.00 ± 0.36
<b>Proposed Method</b>	<b>92.50</b>	<b>87.75</b>	<b>90.12 ± 0.91</b>	<b>95.82</b>	<b>92.41</b>	<b>94.11 ± 0.18</b>

**Table 2.** Gender classification rate of holistic, region-based and partition-based facial patterns using feature level fusion (%)

	CASIA-Iris-Distance		MBGC	
	Overall prediction (%)		Overall prediction (%)	
	Without-PSO	With-PSO	Without-PSO	With-PSO
Entire Face	79.13±0.53	83.05± 1.06	82.69 ± 0.12	87.71 ± 0.45
L-periocular + R-periocular + Nose + Mouth	81.74± 1.04	85.12 ±0.91	84.44 ± 0.77	88.95 ± 0.37
Upper + Middle + Lower	80.35±2.00	83.00 ±0.88	83.17 ± 0.95	86.52 ± 1.20
Entire Face + L-periocular + R-periocular + Nose + Mouth	84.20±0.96	87.62±0.39	86.94 ± 1.31	92.50 ± 0.22
Entire Face + Upper + Middle + Lower	81.83±0.82	85.50±1.14	86.23± 0.72	91.00 ± 0.36
<b>Proposed Method</b>	<b>86.29± 2.03</b>	<b>90.12 ± 0.91</b>	<b>89.28± 1.03</b>	<b>94.11 ± 0.18</b>

**Table 3.** Comparison of the proposed scheme with State-of-the-art methods for gender classification (%)

	CASIA-Iris-Distance		
	Male (%)	Female (%)	Overall prediction (%)
LBP + LPQ + SVM [3]	91.25	83.00	87.12 ± 1.37
Overlapped-ULBP +SVM [7]	91.25	85.75	88.50 ± 0.52
VGGNet + SVM [5]	<b>93.75</b>	<b>86.75</b>	<b>90.25 ± 1.80</b>
<b>Proposed Method</b>	<b>92.50</b>	<b>87.75</b>	<b>90.12 ± 0.91</b>

## 6. CONCLUSION

This study proposed a robust gender prediction scheme for fusion of global and regional facial representations through score and feature level fusion. The extraction of facial features has been performed using Binarized Statistical Image feature (BSIF) technique holistic and regions of face images to predict the gender of subjects. The feature level fusion of study considered concatenation of the region-based information of the features. In addition, Particle Swarm Optimization (PSO) method has been applied to select the optimized subset of feature at the feature level fusion with the purpose of improving the gender prediction rate. In total, eight different global and regional parts of facial images have been used in this study. Finally, the score level fusion of the work combines scores of these eight different facial parts to produce the final set of scores for gender classification. In total, the best classification rate achieved by the proposed method for CASIA-Iris-Distance and MBGC datasets as 90.12% and 94.11% respectively. The experimental results of the study demonstrated the success of the proposed scheme for gender prediction.

## 7. REFERENCES

- Swaminathan, A., Chaba, M., Sharma, D.K., Chaba, Y., 2020. Gender Classification Using Facial Embeddings: A Novel Approach. *Procedia Computer Science*. 167, 2634-2642.
- Khan, A., Gour, B., 2013. Gender Classification Technique Based on Facial Features Using Neural Network. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 4(6), 839-843.
- Zhang, C., Ding, H., Shang, Y., Shao, Z., Fu, X., 2018. Gender Classification Based on Multiscale Facial Fusion Feature. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-6.
- Khan, A.R., Doosti, F., Karimi, M., Harouni, M., Tariq, U., Fati, S.M., AliBahaj, S., 2021. Authentication Through Gender Classification from Iris Images Using Support Vector Machine. *Microscopy Research and Technique*, 84(11), 2666-2676.
- Xie, Z., Guo, Z., Qian, C., 2018. Palmprint Gender Classification by Convolutional Neural Network. *IET-Computer Vision*, 12(4), 476-483.
- Kruti, R., Patil, A., Gornale, S.S., 2019. Fusion of Local Binary Pattern and Local Phase Quantization Features Set for Gender Classification Using Fingerprints. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 7(1), 22-29.
- Eskandari, M., Sharifi, O., 2019. Effect of Face and Ocular Multimodal Biometric Systems on Gender Classification. *IET-Biometrics*, 8(4), 243-248.
- Mukherjee, R., Bera, A., Bhattacharjee, D., Nasipuri, M., 2021. Human Gender Classification Based on Hand Images Using Deep Learning. In: *International Symposium on Artificial Intelligence*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, 314-324.
- Xie, J., Zhang, L., You, J., Zhang, D., Qu, X., 2012. A Study of Hand Back Skin Texture Patterns for Personal Identification and Gender Classification. *Sensors*, 12(7), 8691-8709.
- Gornale, S.S., Patil, A., Ramchandra, K., 2020. Multimodal Biometrics Data Analysis for Gender Estimation Using Deep Learning. *International Journal of Data Science and Analysis*, 6(2), 64-68.
- AlShaye, N., AlMoajil, L., Abdullah-AlWadud, M., 2022. A Gender Recognition System Based on Facial Image. 3rd International Conference on Artificial Intelligence, Robotics and Control (AIRC), IEEE. 10-12 May 2022, Cairo, Egypt, 21-25.
- SheikhFathollahi, M., Heidari, R., 2022. Gender Classification from Face Images Using Central Difference Convolutional Networks. *International Journal of Multimedia Information Retrieval* 11(4), 695-703.
- Ramya, R., Anandh, A., Muthulakshmi, K., Venkatesh, S., 2022. Gender Recognition from Facial Images Using Multichannel Deep Learning Framework. *Machine Learning for Biometrics*. Academic Press, 105-128.
- Kannala, J., Rahtu, E., 2012. Bsif: Binarized Statistical Image Features. In *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern*

- Recognition (ICPR), IEEE, 11-15 November 2012, Tsukuba, Japan, 1363- 1366.
15. Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle Swarm Optimization. In: Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. IEEE, 4, 1942-1948, 27 November-01 December 1995, Perth, WA, Australia.
  16. Phillips, P.J., Flynn, P.J.J., Beveridge, R., Scruggs, W.T., O'toole, A.J., Bolme, D., Bowyer, K.W., Draper, B.A., Givens G.H., Lui, M., Sahibzada, H., Scallan III, A.J., Weimer, S., 2009. Overview of the Multiple Biometrics Grand Challenge. Advances in Biometrics: Third International Conference (ICB 2009), 2-5 June 2009, Alghero, Italy, 705-714.
  17. Biometrics Ideal Test, <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris%20Databases%20CH.asp>, Access date: 12.05.2014.
  18. Hyvarinen, A., Oja. E., 2000. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications. Neural Networks, 13(4-5), 411-430.
  19. Jain, A.K., Ross, A., 2002. Learning User-Specific Parameters in a Multibiometric System. International Conference on Image Processing. IEEE. 22-25 September 2002, Rochester, NY, USA, 1, 1.

## Yukarı Ceyhan Havzasındaki Heyelanların Dağılımının ve Karakteristiğinin Belirlenmesi

Mehmet Emin CİHANGİR\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0001-8881-5308

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 18.10.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: CİHANGİR, M.E., (2024). Yukarı Ceyhan Havzasındaki Heyelanların Dağılımının ve Karakteristiğinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 239-250.

### Öz

Yukarı Ceyhan Havzası topoğrafik ve litolojik geçişlerin sık olduğu bir bölgedir. Çalışmanın amacı yerleşmenin, tektonik aktivitenin ve yüzey şekillenmesinin yoğun olduğu sınırları belirlenen alanda heyelanların dağılımı ve temel karakteristiklerini etkileyen faktörleri detaylı bir şekilde incelemektir. Bu amaçla yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden heyelan envanteri tanımlanmıştır. Envanterin doğruluğu arazi çalışmaları ile sağlanmıştır. Çalışma alanında 441 farklı tip heyelanın havzanın %3,6'sını kapladığı tespit edilmiştir. Heyelanların çoğunun ana tip olarak kayma tipinde olduğu (%70), bunun yanı sıra düşme ve akmalarda belirlenmiştir. Heyelanların büyüklük dağılımının 0,0005 km<sup>2</sup>-10,1 km<sup>2</sup> arasında oldukça geniş olduğu ortaya çıkmıştır. Buna çeşitli jeolojik ve jeomorfolojik süreçlerin etkili olduğu ve farklı mekanizmaların rol oynadığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda literatürdeki heyelan ile ilişkilendirilen topoğrafik faktörler ve jeolojik faktörler uzman tarafından çalışma sahasına özgü olarak değerlendirilmiştir. Buna göre eğim, yükselti, rölyef ve topoğrafik nemlilik indeksi topoğrafik faktörlerin heyelan tipine göre farklı seviyelerde heyelanı kontrol etmektedir. Paleo heyelanların dağ-ova arasındaki keskin rölyef geçişinde gelişmektedir. Havzada heyelanlar kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerinde yoğunlaşmaktadır. Faya yakın zonda küçük heyelanlar bulunmasına rağmen 06 Şubat 2023 depremleri bu sınırlarda küçük düşmelere neden olmuştur. Heyelanlar dağılımı topoğrafik ve jeolojik faktörlerin özelliğine göre değişiklik göstermektedir. Sonuç olarak heyelanların jeolojik, topoğrafik ve çevresel karmaşık etkileşimi sonucunda meydana geldiğini söyleyebiliriz. Bu nedenle çalışmaya ait analizler bölge için heyelan duyarlılık, tehlike ve risk çalışmalarında dikkate alınması açısından önemlidir.

**Anahtar Kelimeler:** Heyelan dağılımı, Jeomorfolojik süreç, Ceyhan havzası, Kahramanmaraş

### Determination of Landslide Distribution and Characteristics in the Upper Ceyhan Basin

#### Abstract

The Upper Ceyhan Basin is an area where topographic and lithological transitions are frequent. The aim of the study is to examine in detail the factors that affect the distribution and fundamental characteristics of

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Mehmet Emin CİHANGİR, [m.e.cihangir@gmail.com](mailto:m.e.cihangir@gmail.com)

landslides in the defined area where settlement, tectonic activity, and surface shaping are intensive. This purpose has been defined through high-resolution satellite images for landslide inventory. The accuracy of the inventory has been ensured through field studies. It has been determined that 441 different types of landslides cover 3.6% of the basin in the study area. The majority of landslides are identified as sliding type (70%), in addition to falling and flowing type landslides. It has been revealed that the size distribution of landslides ranges widely from 0.0005 km<sup>2</sup> to 10.1 km<sup>2</sup>. It has been determined that various geological and geomorphological processes are effective in this, and different mechanisms contribute to it. In this regard, topographic factors associated with landslides in the literature and geological factors have been evaluated specifically for the study area by an expert. Accordingly, slope, elevation, relief, and topographic wetness index control landslides at different levels depending on the type of landslide. The paleo-landslides occurred at the sharp relief transition between the mountain and plain. Landslides are concentrated in sandstone-mudstone-limestone units. Despite the presence of small landslides in the fault-proximal zone, the earthquakes on February 6, 2023 caused minor collapses in these boundaries. Landslides exhibit distribution based according to on the characteristics of topographic and geological factors. Finally, we can say that landslides occur as a result of the complex interaction of geological, topographic, and environmental factors. Therefore, the analyses conducted in this study are important in terms of considering landslide susceptibility, hazard, and risk studies for the region.

**Keywords:** Landslide distribution, Geomorphological processes, Ceyhan Basin, Kahramanmaraş

## 1. GİRİŞ

Nüfus artışıyla uygun olmayan zeminlerin yerleşim yeri olarak açılması heyelan tehlikesini artırmaktadır. Yamaç stabilitesine olumsuz etki eden yapılaşma dünyada olduğu gibi ülkemizde ölümcül heyelanların artmasına neden olmuştur [1]. Heyelan geçmişine sahip yamaçlarda yapılaşmanın artmasıyla birlikte yeniden aktif olma durumu [2] heyelan risk boyutunu artırmaktadır. Bu özelliğe sahip havzalarda heyelanların karakteristiğinin ve kontrol denetiminin ortaya konulması, bölgesel duyarlılık ve tehlike durumunu belirlenmesine ve nihai olarak risk kontrolüne katkı sağlamaktadır [3-5]. Bunun için tip ve alan bakımından heyelan tanımlanması ve buna bağlı envanter oluşturulması önemlidir. Tarihsel seyri incelendiğinde heyelan tanımlanması ilk çalışmalarda; hava fotosu [6-9] ve uydur görüntülerinden [10-12] ilerleyen zamanlarda UAV insansız hava araçlarından elde edilen fotogrametrik DEM ve Lidar (Light Detection and Ranging) DEM'den (Digital Elevation Model) [13] yararlanılmıştır. Fotogrametrik DEM ve Lidar DEM yüksek veri kapasitesinin işlenmesinden dolayı küçük ölçekteki mekânların heyelan envanterinde daha fazla tercih edilmektedir. Bu datalarda envanter hazırlama işlemi uzman veya yarı otomatik olarak belirlenebilmektedir [10,13-15]. Her iki yöntem için heyelanın tespitinde sahada

bıraktığı morfolojik kalıntılar önemlidir. Morfolojik kalıntıların izleri heyelan tipine ve yoğunluğuna bağlıdır. Heyelan tipi ve yoğunluğu topoğrafik, litolojik, iklimik ve tektonik özelliklere bağlı olarak lokal, bölgesel ve yamaçlara göre değişkenlik göstermektedir [16-18].

Heyelan yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda ortam koşullarının farklılığı, heyelanın tipini ve heyelanı meydana getiren koşulları da değiştirmektedir [19,20]. Topoğrafik ve litolojik geçişlerin çok fazla olduğu alanlar, heyelanın büyüklüğü tipi ve aktivite durumu üzerinde etkili olmaktadır [21]. Eğimin heyelan üzerindeki etkinliği kayma, akma, düşme tipi heyelanlarda daha belirgindir. Eğimin <45° fazla olduğu yamaçlarda kurak ve yarı kurak topoğrafyada ayrışma etkinliğinin az olmasından dolayı daha çok moloz ve kaya düşmesi görülmektedir [22]. Rölyef farkının yüksek olduğu yamaçlar daha çok büyük heyelanlara neden olmaktadır [23]. Özellikle rölyef düşme tipi heyelanlarda daha etkilidir [21]. Deprem ve iklimik gibi tetikleyici koşullar ise heyelanın büyüklüğü üzerinde etkilidir. Özellikle iklimik unsorda yağışın şiddeti, sıklığı ve süresi heyelanı alansal büyüklüğü ve yoğunluğunu etkilemektedir [4,5,24,25]. Aynı şekilde depremin merkez üssü ve faya uzaklığı heyelan büyüklük ve yoğunluğunu değiştirmektedir [26,27]. Bu faktörler heyelanın



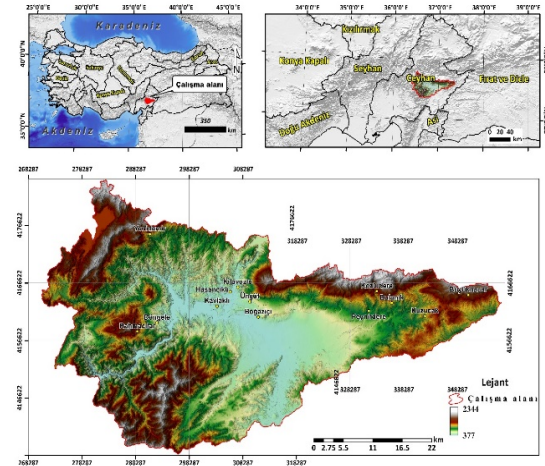
topoğrafyadaki izlerini ve bölgesel anlamda desenini belirlemektedir. Heyelanın havzadaki dağılım paterninin anlaşılması mekânsal ve zamansal açıdan heyelan olabilirliğinin anlaşılmasına katkı sağlar [28]. Bu nedenle heyelan dağılımını ve bunu etkileyen faktörlerin doğru değerlendirilmesi doğru çıktılar elde etmek açısından önemlidir. Verilerin daha kolay işlenebildiği CBS ve Uzaktan algılama teknolojileri heyelanı kontrol eden faktörlerin bir arada değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum bölgesel anlamda yamaç süreçlerinin denetiminde hangi faktörün etkili olduğunun anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Etkin faktörlerin çıktıları yamaç evriminin kestirilmesini sağlayarak heyelan duyarlılık ve tehlikesinin belirlenmesinde katkı oluşturmaktadır. Heyelanın zemin koşulları içindeki deseni pek çok çalışmada ortaya konulmuştur [5,7,26,28-30]. Heyelan desenini iyi bir şekilde ortaya konulması için heyelan envanterinin titizlik ile hazırlanması gerekmektedir. Uzmanın etkisi ve enstrümanlar bu açıdan önemlidir. Heyelanın tespiti ve doğruluk oranı faktörlerin ilişkisinin ortaya daha doğru konulmasını sağlamaktadır. Özellikle bölgesel olarak orta ölçek mekânsal çalışmalarda hazırlayıcı faktörlerin dağılım deseni yamaç sürecini daha iyi ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle genel varsayımları belirlenen ana tipte heyelanları sınıflandırarak literatürde en çok ilişkilendirilen topoğrafik, çevresel ve jeolojik unsurlar içinde heyelanın orta ölçekte nasıl dağılım sergilediğini ana hatlarıyla belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında veri kalitesi, arazi-birim tipi ve istatistiksel sonuçlar eleştirel bir şekilde değerlendirilmiştir. Son olarak, veri toplama, bulgular ve bilgi aktarımı ile ilgili genel yorumlara değinilmiştir.

### 1.1. Çalışma Sahasının Özellikleri

Çalışma alanı, Türkiye'nin güneyinde Akdeniz Bölgesi'nin Ceyhan ana havzasının yukarı kesimini oluşturmaktadır. Fiziki sınırları havza esasına göre belirlenen çalışma alanı yerleşmenin yoğun olduğu Kahramanmaraş merkez ve dolaylarını kapsamaktadır. Çalışma alanı 36°25'31"-37°21'52" D ve 37°47'18"-37°21'14" K koordinatlarında yaklaşık

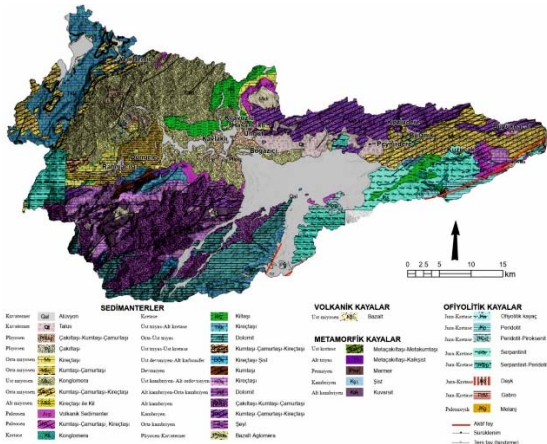
2000 km<sup>2</sup>'lik bir alana sahiptir. Havzanın uzun ekseninin (85 km) kısa eksenine (47 km) oranı 0,55'tir. Çalışma alanı belirlenirken heyelan ve yerleşme yoğunluğu kapsamında fiziksel topoğrafik ünite bütünlüğü esas alınmıştır (Şekil 1). Çalışma alanında Kahramanmaraş'ın Onikişubat, Dulkadiroğlu, Türkoğlu ilçe merkezleri ve bu ilçelere ait mahalleler yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanının lokasyon haritası

Çalışma alanı morfolojik olarak büyük bir bölümü dağlık olmak üzere ovalık alanları da içermektedir. Havzada en yüksek eğim 68° ortalama eğim ise 18,5°'dir. En düşük yükselti 260 m en yüksek 2344 m olup ortalama yükselti 942 m'dir. Yüksek eğim ve rölyef çoğunlukla çalışma alanının kuzey ve güneybatı bölümünde akarsu ve yamaç süreçleri etkindir. Yamaç süreçleri bu alanda daha etkindir. Havzanın kuzeyinde Ceyhan nehrinin yan kollarının oluşturduğu "V" tipi vadiler görülmektedir. Bunun tam tersi olarak Ceyhan nehri ve kolları tarafından oluşturulan düşük eğim ve rölyef değerlerini içeren ovalık alanlar havzanın güneydoğu bölümünde etkindir. Köppen iklim sınıflandırmasına göre Akdeniz iklimini yansıtan "Csa" alt iklim çalışma alanının tamamında etkilidir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Kahramanmaraş istasyon 1960-2022 yılları arası verilerine göre havzanın yıllık ortalama sıcaklığı 16,8 °C ve yıllık ortalama yağış 707 mm'dir. En yüksek aylık toplam yağış 2012 Ocak ayında 321 mm olarak gerçekleşmiştir.

Geç Kretaseden başlayan Arap-Afrika ve Avrasya levhasının yaklaşması ve Neotetisin kapanmasıyla gerçekleşen sıkıştırma rejimi Orta Miyosende bölgede deformasyonlar oluşturmuştur [31-33]. Bu deformasyon sonucu Arap levhası ile Avrasya levhası arasındaki kıta-kıta çarpışması ve Arap levhasının Avrasya levhasına kuzey yönlü baskısı sonucu levhalar arasında Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) transform fayları bölgede sınırlanmıştır [33,34]. Güncel tektoniğin ve buna bağlı deformasyonların etkin olduğu çalışma alanı Ölü Deniz Fayı (ÖDF) Arap ile Afrika, DAF ise Arap ile Anadolu levhaları arasındaki tektonik sınırlara karşılık gelmektedir [35]. Çalışma alanı litolojik birim açısından sedimanterlerin etkin olduğu bununda güneydeki ovalık alanlarda Kuvaterner alüvyonları, kuzeybatıda Miyosen yaşlı konglomeraları, Kuzeydoğuda Miyosen ve Kambriyen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı, güneydoğuda çoğunluk Jura-Kretase yaşlı serpantinler, güneybatıda kireçtaşları bulunmaktadır (Şekil 2).

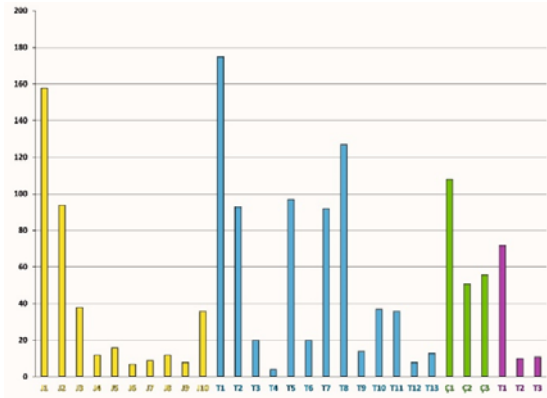


Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası [36-38]

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada heyelan envanterinin oluşturulurken yüksek çözünürlüklü Sentinel 2 (10 m) uydu görüntüsünden, Harita Genel Müdürlüğünden alınan (5x5 m) ve 1:25000 ölçekli topoğrafya haritalarından çalışma alanına ait sayısal yükseklik modelinden (10x10m) yararlanılmıştır. Heyelan envanteri uydu görüntülerinden heyelanın arazide

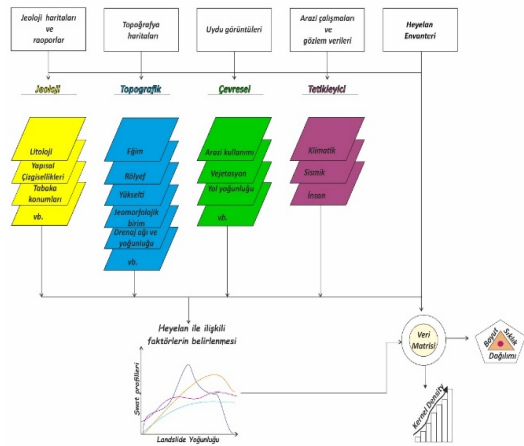
bıraktığı kalıntılardan, yamaç şekilsel özelliklerinden ve SYM üzerinden alınan yamaç profillerinden yararlanılarak belirlenmiştir. Şekilsel özelliklerinden çıkarılamayan heyelanlar hem alansal hem de tiplerine ilişkin yersel doğrulamalar arazi çalışmaları ile yapılmıştır. Heyelanlar ana tipleri bazında (düşme, kayma, akma) [20] sınıflandırılmıştır. Heyelan sınıflandırmanın yanı sıra aktivite durumu yeni heyelan üretme çatlakları, heyelan malzemesinin erozyonu, akarsu kanal gelişimi, bitki örtüsü varlığından aktif ve aktif olmayan şeklinde sınıflandırılmıştır [8]. Literatüre göre en 20 atıf alan heyelan çalışmalarında (Şekil 3) heyelan koşullarıyla ilişkilendirilmiş jeolojik, topoğrafik, çevresel ve tetikleyici faktörler çalışma sahasımız için arazi çalışmaları, bölgesel koşullar ve swat profilleri [39] birlikte değerlendirilerek uzman tarafından belirlenmiştir.



Şekil 3. Heyelan çalışmalarında kullanılan parametreler (En az 20 atıf alan uluslararası yayımlar arasından seçilen 200 çalışma) [40]

İlişkilendirilen/muhtemel faktör değer bilgileri heyelanlara taşınarak veri matrisleri oluşturulmuştur. Bunlardan eğim, yükselti, rölyef ve Topoğrafik nemlilik indeksi (*ing. topographic wetness index (TWI)*) karakteristikleri kernel yoğunluğuna göre mekansal dağılımları değerlendirilmiştir (Şekil 4). SYM verisi yükselti ve eğim değerlerinin hesaplanmasında da kullanılmıştır. SYM verisinden havza içerisinde oluşturulan 2000 m<sup>2</sup>'lik dikdörtgen alanlar içindeki en düşük ve en yüksek farka karşılık gelen rölyef değerleri de elde edilmiştir. Heyelanların uzun

eksenleri kısa eksenlerine oranlanarak heyelan tiplerine göre değişim şekli incelenmiştir. Litolojik birimler ile heyelan tipleri ilişkilendirilerek litolojik birimlerin heyelan tipleri içerisindeki yoğunlukları ve heyelanların aktif fayla olan mekânsal ilişkisi tamponlama (*ing. buffer*) analizleriyle incelenmiştir. Bu bakımdan fayı merkez alan 250 m tampon zonları oluşturulmuş ve bu zonlar içerisinde kalan heyelanların yoğunlukları tespit edilmiştir.

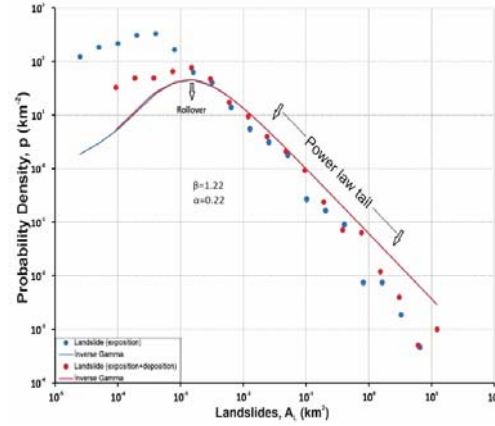


Şekil 4. Yönteme ilişkin akış şeması

### 3. BULGULAR

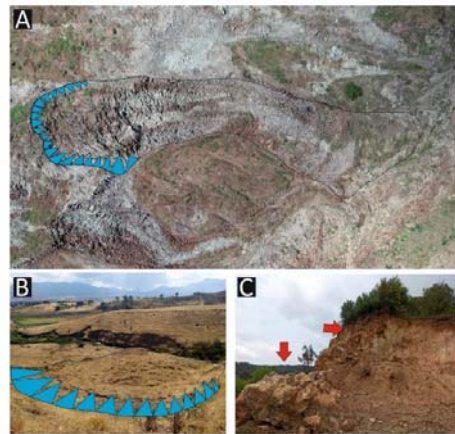
#### 3.1. Heyelan Dağılımı ve Büyüklükleri

Çalışma alanında 441 adet heyelan (Şekil 7) tanımlanmıştır. Heyelan alanı 71,5 km<sup>2</sup> alan kaplamakta ve çalışma alanının %3,6'sına karşılık gelmektedir. Bu heyelanların en küçüğü 0,0005 km<sup>2</sup>, en büyüğü ise 10,1 km<sup>2</sup> Döngel paleo (eski) heyelanı'dır. Envanter heyelanlarının boyutlarına bakıldığında ekstrem büyüklükteki Döngel paleo heyelanı dâhil olmak üzere göreceli olarak 4 heyelan (10,1-5,1 km<sup>2</sup>) çok büyük, 10 heyelan büyük (5,1-1,0 km<sup>2</sup>), 41 heyelan orta (1,0-0,1 km<sup>2</sup>), 342 heyelan küçük (0,1-0,001 km<sup>2</sup>) ve 44 heyelan ise (<0,001 km<sup>2</sup>) çok küçük boyuttadır. Heyelan büyüklüğü ve sıklığı arasındaki kavramsal ilişkide orta büyüklükte heyelanlar üstel kanunları (*ing. Power law*) takip etme eğilimindedir [41,42]. Ancak büyük heyelanlar sıklık ilişkisinde eğrinin altında görünmektedir. Buna karşın daha sık görülen küçük heyelanlar fonksiyonun üstündedir.

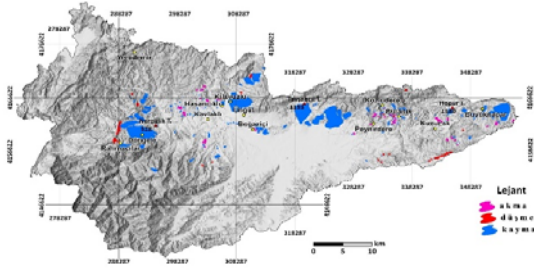


Şekil 5. Heyelan büyüklüğü (kaynak alan (mavi) ve tüm alan (kırmızı)) ile sıklığı arasındaki kavramsal ilişki

Kayma (329 adet), düşme (54 adet), akma (58 adet) (Şekil 4) olarak 3 ana tip altında toplanan heyelanların (Şekil 6) %98'sini (70 km<sup>2</sup>) kaymalar, %0,8'ini (0.6 km<sup>2</sup>) düşmeler, %1,1'ini (0.8km<sup>2</sup>) ise akmalar oluşturmaktadır. 170 adet kayama tipi heyelan aktif olup, 1,7 km<sup>2</sup> alana ve toplam kayma tipi heyelanların %2,4'üne karşılık gelmektedir. Havzadaki havzanın kuzeyinde ve batı kesiminde yoğunlaşmaktadır. Heyelan tiplerine bakıldığında aktif akmalar havzanın batı kesiminde Kuzucak ve Büyüknacar yerleşmelerinde (Şekil 6A), aktif kaymalar Kavlaklı bölgesinde (Şekil 6B), aktif düşmeler ise havzanın batı kesiminde Başkonuş (Şekil 6C) bölgesinde görülmektedir (Şekil 7).

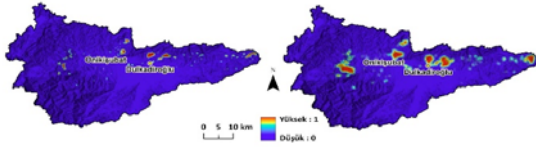


Şekil 6. Çalışma alanındaki heyelan tiplerine örnekler



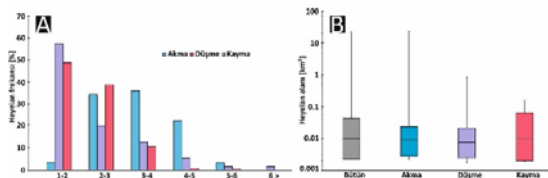
Şekil 7. Heyelan tipleri dağılım haritası

Heyelanın kaynak noktasına ve tüm alanına göre değerlendirilen heyelan yoğunluğunda Onikişubat ve Dulkadiroğlu bölgesinde yoğunluk kazandığı görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Heyelanın kaynak alanı (A) ve tüm alanına (B) göre yoğunluk haritaları.

Heyelanın kısa eksen oranları heyelanın etki mesafesini (*ing. runoff*) belirlemesini sağlamaktadır [21]. Heyelan uzunluk-genişlik oranı değerleri 1-7 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 9A). Bu oranlar heyelan tiplerine göre farklılıklar göstermektedir. Akma ve düşmelerde oransal olarak farklar daha yüksektir. Kayma ve düşmelerdeki oransal fark yakındır. Toplam heyelanlarda akma ve düşmelerde etki mesafesi ortalama olarak yüksektir. Akma tipi heyelanlarda en yüksek 5,5 ortalama ise 3,4, düşme tipi heyelanlarda en yüksek 6,1 ortalama ise 2,3 ve kayma tipi heyelanlarda ise en yüksek 5,4 ortalama ise 2,2 olarak belirlenmiştir.

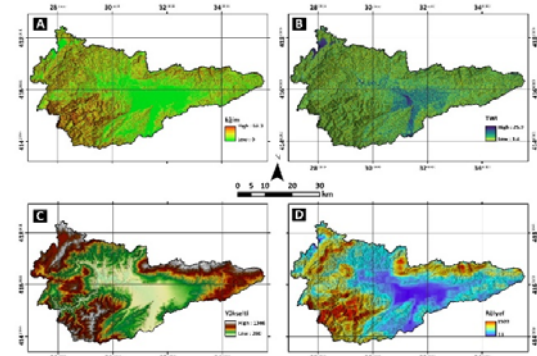


Şekil 9. Heyelan ana tiplerine göre uzunluk genişlik oranları (A) ve alansal dağılımları (B). Şekil B'da yer alan heyelan alanının ölçüğü logaritmik olarak (Log10) verilmiştir

## 3.2. Bölgesel Heyelan Dağılımını Kontrol Eden Faktörler

### 3.2.1. Topoğrafik Faktör

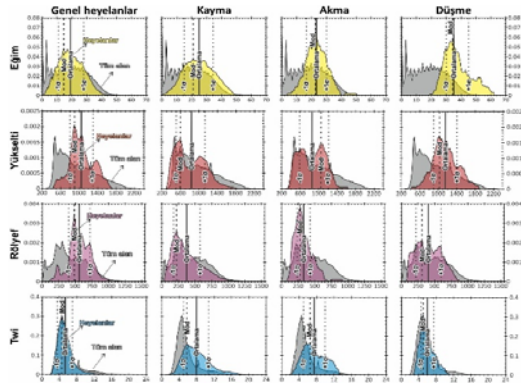
Heyelan oluşumu ve dağılımında topoğrafik faktörlerin etkisini ortaya koymak için farklı tipteki heyelanın kaynak kısmından alınan eğim, yükselti, rölyef ve topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) bilgileri (Şekil 10) kernel yoğunluk kestirimine göre normalize edilerek analiz edilmiştir.



Şekil 10. Çalışmada kullanılan başlıca topoğrafik parametreler. (A) Eğim, (B) Topoğrafik nemlilik indeksi, (C) Yükseklik, (D) Topoğrafik rölyef

Elde edilen bulgularda havza eğim değerlerinin en yüksek  $68^\circ$  ve ortalama eğimin  $18,5^\circ$  olduğu, heyelan tipi fark etmeksizin heyelanların en yüksek  $56,5$ , ortalama ise  $19,5^\circ$  eğim değerlerinde olduğu görülmektedir. Heyelan tipi olarak bu değerlere bakıldığında kaymaların  $3^\circ$ -  $55^\circ$  arasında eğim değerlerinin değiştiği ve bu tipteki heyelanların ortalama eğiminin  $23,5^\circ$  olduğu tespit edilmiştir. Akmalarda ise bu değerler  $7,6^\circ$ -  $46,1^\circ$  değişmekte olup, akmaların eğim ortalaması ise  $23,5^\circ$ 'dir. Düşmeler akma ve kaymalara göre daha yüksek eğim değerlerine sahip olup havza içinde  $24,5^\circ$ -  $56,5^\circ$  eğim değerlerinde ve düşme tipi heyelanların ortalama eğimi  $37,5^\circ$ 'dir (Şekil 11). Yükselti faktöründeki değerlerde havzanın  $260$  m- $2344$  m yükselti değerleri arasında değiştiği ve havza ortalamasının  $942$  m olduğu görülmektedir. Genel olarak heyelanlar  $431$ - $1711$  m yükseltelerde dağılmakta ve bu heyelanların yükselti ortalaması  $1053$  m'dir. Heyelan tip bakımından yükseltelerde kaymalar  $442$ - $1703$  m arasında dağılım göstermekte

ve ortalaması 820 m'dir. Akmalarda ortalama 852 m ve alt limit değer 510m bakımından kaymaların üzerinde üst limit bakımında kaymalardan daha düşük 1460 m değerlerine sahiptir. Düşme tipi heyelanlar ise diğer iki ana tip heyelana göre 583-1711 m arasında daha yüksek alanlarda olup, ortalaması ise 1146 m'dir (Şekil 10). Minimum ve maksimum yükselti farkı değerlerini ifade eden rölyef değerlerinde havza en düşük 11m en yüksek 1503 m ve ortalama 431 m rölyef değerlerine sahiptir. Tüm heyelanlarda bu değerler en düşük 117 m en yüksek 1022 m ve ortalama havza ortalamasında yüksek 560 m'dir. Heyelan bazında kaymalarda en düşük 123m en yüksek 1022 ve ortalama 371 m olarak belirlenmiştir. Akmalarda bu değerler en düşük 171 m en yüksek 828 m ve ortalama 338 m olduğu görülmektedir. Düşme tipi heyelanlar ise, en düşük 198 m en yüksek 754 m ve ortalama 411 m değerlerine sahiptir (Şekil 10). Topoğrafyada suya doygun alanları ve boyutlarını ifade etmek amacıyla özgül havza alanının yamaç eğimine oranlanması ile elde edilen [43] TWI değerlerinde havza en düşük 1,2 olup, en yüksek 25,9 ve ortalama 5,7 değerlerine sahiptir. Tüm heyelanlarda en düşük 1,6 en yüksek 18,6 ve ortalama 5,3 görülmektedir. Heyelan tipine göre kaymalarda en düşük 2,7, en yüksek 18,6 ve ortalama ise 7,9'dur. Akmalarda en düşük 3,9 en yüksek 12 ve ortalama 7,52'dir. Düşme tipinde ise en düşük 3,8 olup, en yüksek 9,8 ve ortalama 5,8 değerleri görülmektedir (Şekil 10).



**Şekil 11.** Farklı heyelan tipleri için eğim, yükseklik, rölyef ve TWI değerlerinin olasılık dağılım kestirimleri.  $\pm 1\sigma$  (standart sapma) değerleri toplam verinin  $\sim 70\%$ 'ine karşılık gelmektedir

### 3.2.2. Litoloji

Çalışma alanında heyelan tipine göre her bir heyelanın kaynak alanından alınan litolojik bilgilerine göre değerlendirme yapılmıştır. Havza içinde litolojik birimler açısından en geniş alanı  $8,5\%$ 'i Kambriyen yaşlı (Kkçki) ve  $8,7\%$ 'si Orta Miyosen (Mkçk) yaşlı olmak üzere  $312 \text{ km}^2$  ile Kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimleri oluşturmaktadır. En fazla heyelanı da barındıran bu birimlerde, Kambriyen yaşlı (Kkçki) alanında  $27\%$  ve Orta Miyosen (Mkçk) yaşlı alanında  $10,2\%$  olmak üzere toplam heyelanın  $37,2\%$ 'si gerçekleşmiştir. Bu birimlerde oransal olarak en fazla payı  $37,6\%$  ile kaymalar oluşturmaktadır. Akma tipi heyelanlarında en fazla  $50\%$ 'si Orta Miyosen kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerinde gözlemlenmiştir. Alan bakımından ikinci sırada  $294 \text{ km}^2$  ile farklı yaşlara sahip Orta Miyosen, Üst Triyas-Alt Kretase, Üst Kambriyen- Alt Ordovisiyen kireçtaşı birimleri bulunmaktadır. Bu birimler toplam heyelan kaynak alanının  $\sim 5 \text{ km}^2$ 'si ve  $10,6\%$ 'sına karşılık gelen kısmını oluşturmaktadır. Üçüncü sırada,  $\sim 290 \text{ km}^2$ 'lik bir alanı kaplayan Üst Miyosen yaşlı konglomera birimleri bulunmaktadır. Bu birimler toplam heyelan kaynak alanının  $2,84 \text{ km}^2$ 'si ve  $6\%$ 'sına karşılık gelen kısmını oluşturmaktadır. Bu birimlerde  $2,75 \text{ km}^2$ 'si gibi büyük çoğunluğunda kaymalar meydana gelmiştir. Dördüncü sırada ise  $\sim 261 \text{ km}^2$  ile kuvaterner alüvyonları yer alır. Bu birimler, havzanın  $14,3\%$ 'ünü oluşturur. Bu alanlarda da sadece kaymalar gözlemlenmiş olup, toplam heyelanın  $0,2\%$ 'sini teşkil eder. Heyelan bakımından elde edilen bulgulara bakıldığında kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerinden sonra heyelanın ikinci en çok kaynaklandığı birim talus depoları olup, havzada  $\sim 69 \text{ km}^2$ 'lik bir alanı kaplamaktadır. Bu birimlerde düşme ve kayma tipi heyelanlar gerçekleşmiştir. Düşmelerin  $28\%$ 'i, kaymaların ise  $8,8\%$ 'i bu birimlerde tespit edilmiştir. Heyelan yüzdeleri bakımından diğer birimlere bakıldığında Orta Miyosen ve Kretase-Paleosen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı  $6,7\%$ 'sini, Jura-Kretase yaşlı serpantin-peridotit  $6\%$ 'sını, Paleosen yaşlı volkanik sedimanter  $5,4\%$ 'ünü, Kretase yaşlı kilitaşı  $4,6\%$ 'sını, Alt Miyosen yaşlı killikireçtaşı  $2,8\%$ 'ini, Pliyosen ve Alt Kambriyen yaşlı

çakıltası-kumtaşı-çamurtaşı %1,4'ünü, Devoniyen yaşlı peridotit %0,1'ini, Jura-Kretase yaşlı kumtaşı %0,4'ünü, Alt Kambriyen-Orta Kambriyen yaşlı dolomit %0,2'ini, Jura-Kretase yaşlı peridotit %0,1'ini, Orta Kambriyen yaşlı şeyl %0,01'ini oluşturmaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Litolojik birimlerin heyelan tipine göre yoğunlukları

Adı	Zaman	Simge	Bütün havza			Bütün heyelan			Akma			Düşme			Kayma		
			Alan (km <sup>2</sup> )	%	Havza içindeki yoğunluk	Alan (km <sup>2</sup> )	%	Havza içindeki yoğunluk	Alan (km <sup>2</sup> )	%	Havza içindeki yoğunluk	Alan (km <sup>2</sup> )	%	Havza içindeki yoğunluk	Alan (km <sup>2</sup> )	%	Havza içindeki yoğunluk
Pliyosen	Çakıltı-Kumtaşı-Çamurtaşı	PKKç	42.9	2.4	0.05	0.46	1.0	0.0002	0.04	0.01	0.000002	0.003	0.01	0.000001	0.45	0.9	0.0002
Kretase	Kilitaşı	KK	57.4	3.2	0.03	2.19	4.6	0.001	0.04	0.09	0.000002				2.15	4.5	0.001
Orta Milyosen	Konglomera	Mko	289.9	15.9	0.14	2.84	5.9	0.001	0.08	0.16	0.000004	0.01	0.02	0.000001	2.75	5.8	0.001
Orta Milyosen	Kumtaşı-Çamurtaşı	Mkc	42.4	2.3	0.02	3.09	6.5	0.002	0.001	0.00	0.0000003	0.01	0.01	0.000003	3.08	6.4	0.002
	Kumtaşı-Çamurtaşı	KFKç	15.0	0.8	0.01	0.13	0.3	0.0001	0.01	0.03	0.000001				0.11	0.2	0.0001
Kretase-Paleosen	Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı	Mkkç	158.0	8.7	0.08	4.88	10.2	0.002	0.16	0.33	0.000008	0.01	0.02	0.000004	4.71	9.9	0.002
Orta Milyosen	Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı	JKS	65.5	3.6	0.03	0.04	0.1	0.000002	0.02	0.04	0.000001	0.004	0.01	0.000002	0.01	0.0	0.000001
Jura-Kretase	Serpantinli-Peridotit	JKsp	79.4	4.4	0.04	2.88	6.0	0.001	0.0006	0.001	0.0000003				2.88	6.0	0.001
Alt Kambriyen	Çakıltı-Kumtaşı-Çamurtaşı	KKç	184.3	10.1	0.09	0.23	0.5	0.0011				0.001	0.002	0.0000004	0.23	0.5	0.0011
Alt Milyosen	Kilitaşı-Kireçtaşı	Mkk	18.9	1.0	0.01	1.33	2.8	0.001	0.01	0.03	0.000001				1.31	2.7	0.001
Orta Milyosen	Kireçtaşı	Mk	39.8	2.2	0.02	4.28	9.0	0.002				0.09	0.2	0.000005	4.18	8.8	0.002
Alt Kambriyen-Alt Ordovisyen	Kireçtaşı	KDK	87.8	4.8	0.04	0.20	0.4	0.0001				0.001	0.002	0.0000004	0.20	0.4	0.0001
Kambriyen	Kumtaşı-Çamurtaşı-Kireçtaşı	KKç	154.1	8.5	0.08	11.50	27.0	0.01				0.01	0.03	0.000001	12.89	27.0	0.006
Jura-Kretase	Peridotit	JPD	202.1	11.3	0.01	0.03	0.1	0.000002				0.03	0.1	0.000002			
Orta Kambriyen	Şeyl	KS	18.5	1.0	0.01	0.01	0.01	0.000003				0.001	0.002	0.000000	0.005	0.01	0.000002
Kuvaterner	Talıs	TK	69.1	3.8	0.03	8.67	18.2	0.004				0.08	0.2	0.000004	8.59	18.0	0.004
Paleosen	Volkanik Sedimanter	Pvk	71.1	1.2	0.01	2.56	5.4	0.001				0.01	0.03	0.000001	2.55	5.3	0.001
Devoniyen	Kumtaşı	DK	8.8	0.5	0.004	0.19	0.4	0.0001							0.19	0.4	0.0001
Alt Kambriyen-Orta Kambriyen	Dolomit	Kd	17.9	1.0	0.01	0.09	0.2	0.00005							0.09	0.2	0.00005
Permiyen	Memmer	Pmr	0.8	0.0	0.0004	0.19	0.4	0.0001							0.19	0.4	0.0001
Kuvaterner	Alüvyon	Qal	260.9	14.3	0.13	0.01	0.02	0.000004							0.01	0.02	0.000004
Üst Triyas-Alt Joretase	Kireçtaşı	TKK	167.0	9.2	0.08	0.57	1.2	0.0003							0.57	1.2	0.0003
<b>Toplam</b>			<b>1819.6</b>	<b>100</b>	<b>0.91</b>	<b>47.7</b>	<b>100</b>	<b>0.02</b>	<b>0.3</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.0001</b>	<b>47.1</b>	<b>98.7</b>	<b>0.02</b>

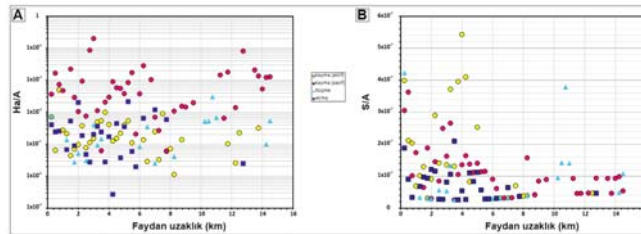
### 3.2.3. Yapı

Heyelan tipine göre her bir heyelanın kaynak alanından alınan sayısının tampon zon alanına oranının faya uzaklığa bağlı ilişkisi incelenmiştir. Heyelan sayısının tampon alanına oranlanmasında faya yakın alanlarda aktif ve pasif kayma tipi heyelan sayısının yoğunlaştığı görülmektedir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Fakat kayma tipi heyelanlar sayısal olarak her 0.25 km'lik tampon zonun %90'nında bulunmaktadır. Korelasyon katsayılarına bakıldığında pasif kaymalar için -0.50 ile aktif kaymalar için -0.44 ile faya uzaklık ile aralarında güçlü bir negatif ilişki çıkmaktadır. Akmaların sayısal olarak 0.250-8 km arasında zonlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Faya uzaklığı sayısal bakımından kaymalardaki gibi benzer bir eğilim gösteren düşmeler -0,36 korelasyon katsayı değeri ile negatif ilişkinin görülmektedir. Düşmeler 0.05 korelasyon katsayısına göre faya uzaklık arttıkça düşme değeri

hafifçe artma eğilimindedir, ancak ilişki çok zayıftır.

Heyelanın kaynak alanının ve tampon zon alan bilgilerine oranının faya uzaklığa bağlı heyelan ilişkisi de değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede kayma tipi heyelanın alansal olarak 0,25 km aralıklı tampon zonlarının %90'ından fazlasında alan kaplamaktadır. Faya uzaklık ilişkisinde aktif kaymalarda -0,25, pasif kaymalarda -0,05 korelasyon görülmektedir. Buradaki negatif ilişki aktif kaymalarda daha fazladır.

Akmalar alansal olarak 0,250-8 km arasındaki zonda yoğunlaşmaktadır. Heyelan alan zon alan oranının faya uzaklık korelasyonu 0,045 ile çok zayıf bir pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir. Düşmelerde ise diğer tip heyelanlara göre 0,33 korelasyon katsayısı pozitif bir doğrusal ilişki göstermektedir.



Şekil 12. Faydan olan uzaklıklara göre heyelan alan (A) ve sayı yoğunluğunun (B) azalımı

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Flüviyal ve tektonik süreçlerin etkin olduğu Ceyhan havzasının yukarı kesimi derin vadilere ve yüksek topoğrafik rölyefin sonucu dağlık, yüksek eğimli dağ-ova geçişlerine ve düz ovalık alanlara sahiptir. Yerleşim yeri olarak bölgede daha yüksek eğime sahip dağ-ova geçişlerinin olduğu paleo heyelan topoğrafyası tercih edilmiştir. Çalışmada, fiziki (heyelan) ve beşeri etkileşimin (nüfus ve yerleşme) yoğun olduğu havza sınırları alanı olarak belirlenmiştir. Çalışmada, sınırları belirlenen alanda heyelanların dağılımı, tipi, büyüklüğü, aktivitesi, topoğrafik ve litolojik etkilerini ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmektedir. Çalışmada heyelan dağılımı karakteristiği tetikleyici faktörden bağımsız hazırlayıcı koşullar üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda çalışma alanında 442 heyelan alanı belirlenmiş olup, toplam havza yüzölçümünün %3,6'sını kapladığı tespit edilmiştir. Çalışma alanındaki heyelanların çoğunluğu kayma tipinde olup, bu tip heyelanlar toplam alanın %70'ini oluşturmaktadır. Bu durum, çalışma alanının topoğrafyanın kayma tipi heyelanları daha sık oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, düşme ve akma tipi heyelanların da mevcut olması, farklı faktörlerin etkisine işaret etmektedir. Heyelanların topoğrafyada dağınık dağılımı, çalışma alanının heterojen jeolojik bileşime, farklı litolojik birimlere ve topoğrafik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, heyelanların büyüklük dağılımı oldukça geniş olması çeşitli mekanizmaların etkili olduğunu ve geniş bir yelpazede süreçlerin rol aldığını düşündürmektedir. Heyelan aktivitesinin zaman zaman etkin olduğu bölgede 0.0005 km<sup>2</sup> iken en büyük alanı 10,1 km<sup>2</sup> heyelanın bulunduğu ve bu heyelanların bir kısmının iç içe geliştiği görülmüştür. Heyelanların havzanın kuzeyinde ve batı kesiminde yerleşmenin yoğun olduğu sahalarda bulunması dikkat çekicidir. Bu alanlardan Kavlaklı, Bulanık ve Kuzucak bölgelerinde gerçekleşen heyelanların diğer bölgelere göre daha aktif olduğu tespit edilmiştir. Akma ve düşmelerde etki mesafesinin yüksek olması tehlike ve risk oluşturmaktadır. Bu nedenle tip ve boyutsal açıdan farklılıklara sahip bu heyelanları dağılımını kontrol mekanizmasının bilinmesi önem taşımaktadır.

Litolojik dağılım incelendiğinde, Kambriyen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerde toplam heyelanın %27'si Orta Miyosen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşının %10,2'sinde meydana geldiği görülmüştür. Bu, belirli litolojik özelliklerin heyelan oluşumları üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Fakat bu birimlerde Kambriyen yaşlı olanlarında çoğunlukla paleo kaymalar bulunmaktadır. Bulanık ve Kuzucak bölgelerinde aktif heyelanların Orta Miyosen kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerinde gerçekleşmiştir. Aktif heyelanın yoğun olduğu Kavlaklı bölgesinde Kretase yaşlı kiltası ve Üst miyosen konglomera birimlerinde kaymaların yoğun olarak tespit edilmiştir. Bunun dışında 170 heyelanın aktif heyelanın çoğunluğunun daha genç jeolojik birimlerde yer alması dikkat çekmektedir.

Faydan uzaklığın yakın olan zonlarda alansal olarak daha küçük heyelanların fay tarafından denetlendiği düşünülmektedir. Fayın denetiminin belirsiz olduğu, faya yakın zonlarda azalan yoğunluk değerlerinin daha sonraki mesafelerde bağımsız davrandığı korelasyonun dışında olmasından kaynaklanmaktadır. Şu durum belirtilmeli yapılan arazi çalışmalarında 06 Şubat 2023 depremlerinde çalışma sınırlarında belirli birkaç düşme dışında çalışma alanı sınırlarında heyelan gözlenmemiştir. Bu durumun tetikleyici koşulların bu alanda daha iklimik kaynaklı olduğunu düşündürmektedir.

Eğim, yükselti, rölyef ve topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) gibi topoğrafik faktörlerin heyelan yoğunluğunu etkilediği görülmüştür. Havzanın genel olarak dağılımda tüm faktör sınıflarında pozitif çarpıklık sergilendiği belirlenmiştir. Eğimin etkisi düşme ve akmalarda kaymalara göre daha fazladır. Belirli bir akma ve kaymalarda yükseltinin grafiğinin çift hörgüç yapması yükseltinin farklı etkenlerle birlikte çalıştığını göstermektedir. Öte yandan düşmelerin 1000 m yükseltiden sonra 30-40° eğim değerlerinde görülmesi daha çok fiziksel ayrışma etkinliğini açıklama niteliindedir. Genel heyelanlar ile benzer dağılım gösteren topoğrafik nemlilik indeksi heyelan tipi özelinde akma ve kaymalarda yüksek değerlerde görülmektedir. Bu durumun özellikle akmaların zemin su içeriğinin yüksek olduğu alanlarda oluştuğunu

kanıtlamaktadır. Bu durumun topoğrafik faktörlerin heyelan oluşumları üzerindeki etkilerini göstermektedir. Tektonik olarak aktif bir alan olan araştırma alanında sıkıştırma rejimin etkili olduğu [44] düşünüldüğünde topografyadaki değişimin heyelan aktivitesini etkileyeceği öngörülmektedir. Genel sonuç olarak çalışmada, topoğrafik faktörlerin heyelanların dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ve bu etkileşimin karmaşık bulunduğu gösterilmektedir. Dik eğimler ve yüksek yükseltiler, heyelanların daha sık meydana geldiği alanlarda belirgin olarak görülmüştür. Bununla birlikte, bu çalışmada rölyefin belirli alanlarda heyelanların dağılımını etkilediği belirlenmiştir. Daha düz alanlarda heyelanların daha seyrek olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli ve sonrasındaki depremlerin topografya meydana getireceği değişiklik zemin stabilitesi ve dolayısıyla heyelan aktivitesini değiştireceği düşünülmektedir [45-48]. Yaşlı birimlerdeki heyelanların stabilizeye ulaştığı paleo heyelanlar gözlemlenmiştir. Fakat buradaki beşerî aktivite bu paleo heyelanların belirli bölümlerini yeniden aktif hale getirmektedir. Bunun dışında genç litolojide ve genç tektonik etkisinde görülmesi gençleşme süreçlerinin de heyelan oluşumunda önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Nihai sonuç olarak heyelan olgusunun jeolojik, topoğrafik ve çevresel faktörlerle karmaşık bir etkileşim içinde olduğunu göstermektedir. Bulgular, bu tür analizlerin doğal afetlerin risk değerlendirmesi ve yönetimi açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu veriler, gelecekteki heyelan duyarlılık, tehlike ve risk çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Afet öncesi çalışmalar için önemli bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar (BAP) Koordinasyon Birimi tarafından 2021/7-19 A nolu "Kahramanmaraş'ta Heyelanların Zamansal Aktivite Durumu, Jeomorfolojik Karakteristikleri ve Oluşumlarında Etkili Olan Faktörlerin Belirlenmesi (Bu proje bölgesel sorunların 205. Maddesi olan "Kahramanmaraş'ta doğal afet (heyelan, sel taşkın, deprem vb.) oluşturulabilecek

durumlara yönelik çalışmalar" ile ilişkilidir.)" adlı altyapı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı yazar teşekkürlerini sunmaktadır. Ayrıca yazar hakemlere de katkılarından dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Fidan, S., Görüm, T., 2020. Türkiye’de Ölümcül Heyelanların Dağılım Karakteristikleri ve Ulusal Ölçekte Öncelikli Alanların Belirlenmesi, *Türk Coğrafya Dergisi*, (74), 123-134.
2. Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide Inventories and Their Statistical Properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
3. Henriques, C., Zêzere, J.L., Marques, F., 2015. The Role of the Lithological Setting on the Landslide Pattern and Distribution. *Engineering Geology*, 189, 17-31.
4. Tsai T.-L., 2008. The Influence of Rainstorm Pattern on Shallow Landslide. *Environmental Geology*, 53, 1563-1569.
5. Mărgărint, M.C., Niculiță, M., 2017. Landslide Type and Pattern in Moldavian Plateau, NE Romania. *Landform Dynamics and Evolution in Romania*, 271-304.
6. Rib, H.T., Liang, T., 1978. Recognition and Identification. *Transportation Research Board Special Report*, 176.
7. Varnes, D.J., 1978. Slope Movement Types and Processes. *Special Report*, 176, 11-33.
8. Dikau, R., 1999. The Recognition of Landslides. *Floods and Landslides: Integrated Risk Assessment*, Springer.
9. Hansen, A., 1984. *Landslide Hazard Analysis. Slope Instability*.
10. Pang, D., Liu, G., He, J., Li, W., Fu, R., 2022. Automatic Remote Sensing Identification of Co-Seismic Landslides Using Deep Learning Methods. *Forests*, 13(8), 1213.
11. Wang, T., Liu, M., Zhang, H., Jiang, X., Huang, Y., Jiang, X., 2021. Landslide Detection Based on Improved Yolov5 and Satellite Images. 2021 4th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI), 367-371.



12. Mondini, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Rossi, M., Cardinali, M., Ardizzone, F., 2011. Semi-Automatic Recognition and Mapping of Rainfall Induced Shallow Landslides Using Optical Satellite Images. *Remote Sensing of Environment*, 115(7), 1743-1757.
13. Görüm, T., 2019. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment From Airborne Lidar Data. *Engineering Geology*, 258, 105155.
14. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in A Multi-Scale Study. *Central Italy, Geomorphology*, 31(3-4), 181-216.
15. Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M. L., 1997. *Landslide Recognition: Identification, Movement, and Causes*, Edition. International Association of Geomorphologists.
16. Dai, F., Lee, C., 2001. Frequency-Volume Relation and Prediction of Rainfall-Induced Landslides. *Engineering Geology*, 59(3-4), 253-266.
17. Regmi, N.R., Giardino J.R., Vitek, J.D., 2014. Characteristics of Landslides in Western Colorado. USA, *Landslides*, 11(4), 589-603.
18. Wu, C.H., Chen, S.C., Chou, H.T., 2011. Geomorphologic Characteristics of Catastrophic Landslides During Typhoon Morakot in the Kaoping Watershed. Taiwan, *Engineering Geology*, 123(1-2), 13-21.
19. Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
20. Varnes, D.J., 1958. *Landslide Types and Processes*. *Landslides and Engineering Practice*, 24, 20-47.
21. Cihangir, M.E., Görüm, T., 2016. Kelkit Vadisinin Aşağı Çığrında Gelişmiş Heyelanların Dağılım Deseni ve Oluşumlarını Kontrol Eden Faktörler. *Türk Coğrafya Dergisi*, 66.
22. Huggett, R., Shuttleworth, E., 2022. *Fundamentals of Geomorphology*. Edition, Taylor & Francis.
23. Jeandet, L., Steer, P., Lague, D., Davy, P., 2019. Coulomb Mechanics and Relief Constraints Explain Landslide Size Distribution. *Geophysical Research Letters*, 46(8), 4258-4266.
24. Vasu, N.N., Lee, S.-R., Pradhan, A.M.S., Kim Y.-T., Kang, S.-H., Lee, D.-H., 2016. A New Approach to Temporal Modelling for Landslide Hazard Assessment Using an Extreme Rainfall Induced-Landslide Index. *Engineering Geology*, 215, 36-49.
25. Zêzere, J., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S., Marques, R., Garcia, R.A., 2015. Rainfall Thresholds for Landslide Activity in Portugal: A State of The Art. *Environmental Earth Sciences*, 73, 2917-2936.
26. Gorum, T., Fan, X., Van, Westen, C.J., Huang, R.Q., Xu, Q., Tang, C., Wang, G., 2011. Distribution Pattern of Earthquake-Induced Landslides Triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake. *Geomorphology*, 133 (3-4), 152-167.
27. Keefer D.K., 2002. Investigating Landslides Caused by Earthquakes-A Historical Review. *Surveys in Geophysics*, 23, 473-510.
28. Cihangir, M.E., Görüm, T., Nefeslioğlu, H.A., 2018. Heyelan Tetikleyici Faktörlerine Bağlı Mekânsal Hassasiyet Değerlendirmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (70), 133-142.
29. Micu, M., 2017. Landslide Types and Spatial Pattern in the Subcarpathian Area. *Landform Dynamics and Evolution in Romania*, 305-325.
30. Basu, T., Pal, S., 2018. Identification of Landslide Susceptibility Zones in Gish River Basin. West Bengal, India, *Georisk: Assessment and Management of Risk For Engineered Systems and Geohazards*, 12(1), 14-28.
31. Dewey, J., Hempton, M., Kidd, W., Saroglu, F., Şengör, A., 1986. Shortening of Continental Lithosphere: The Neotectonics of Eastern Anatolia A Young Collision Zone. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(1), 1-36.
32. Mckenzie, D., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109-185.
33. Şengör, A.C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach, *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
34. Şengör, A., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları-Fundamentals of The Neotectonics of

- Turkey, Geological Society of Turkey, Conference Series.
35. Kürçer, A., Elmacı, H., Özdemir, E., Güven, C., Selim, Ö., 2023. 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Genişletilmiş Bilgi Notu, Technical Report, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara.
  36. Usta, D., 2018, 1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Gaziantep-N37 Paftası No: 266, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
  37. Sümengen, M., 2014. 1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Gaziantep- M 37 Paftası No: 215, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
  38. Sümengen, M., 2014. 1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Gaziantep- M 37 Paftası No: 216, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
  39. Pérez-Peña, J.V., Al-Awabdeh, M., Azañón, J.M., Galve, J.P., Booth-Rea, G., Notti, D., 2017. Swath Profiler and N Profiler: Two New Arcgis Add-Ins for the Automatic Extraction of Swath and Normalized River Profiles. *Computers & Geosciences*, 104, 135-150.
  40. Gökçeoğlu, C., Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanmasında Kullanılan Parametrelere İlişkin Belirsizlikler. *Yerbilimleri*, 22(23), 189-206.
  41. Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Reichenbach, P., 2002. Power-Law Correlations of Landslide Areas in Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3-4), 169-183.
  42. Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide Inventories and Their Statistical Properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
  43. Moore, I.D., Grayson, R.B., 1991. Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data. *Water Resources Research*, 27(6), 1177-1191.
  44. Ergün, A., 1989. Doğu Toroslar'da Çarpışma Sonrası Kratonik Havzaların Evrimi. *Mta Dergisi*, 109, 77-88.
  45. Akinci, A.C., Ünlügenç, U.C., 2023. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri: Sahadan Jeolojik Veriler, Değerlendirme ve Adana için Etkileri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(2), 553-569.
  46. Aksoy, E., Akgün, E., Softa, M., Koçbulut, F., Sözbilir, H., Tatar, O., Çolak Erol S., 2023. 6 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Depreminin Doğu Anadolu Fay Zonu Erkenek ve Pazarcık Segmentleri Üzerindeki Etkisi: Çelikhan-Gölbaşı (Adıyaman) Arasından Gözlemler. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 5(1), 85-104.
  47. Gokceoglu, C., 2023. 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes: A General Overview, *The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 417-424.
  48. Meng, J., Kusky, T., Mooney, W.D., Bozkurt, E., Bodur, M.N., Wang, L., 2024. Surface Deformations of the 6 February 2023 Earthquake Sequence. *Eastern Türkiye, Science*, 383(6680), 298-305.

## İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek (Adana) Arasında Kalan Topraklardaki Ağır Metal İçeriklerinin Zenginleşme Faktörüne Göre Değerlendirilmesi

Mustafa AKYILDIZ\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-0371-8646

Fatimah SULEIMAN<sup>1</sup> ORCID 0009-0005-3508-4077

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 07.11.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: AKYILDIZ, M., SULEIMAN, F., (2024). İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek (Adana) Arasında Kalan Topraklardaki Ağır Metal İçeriklerinin Zenginleşme Faktörüne Göre Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 251-259.

### Öz

Bu araştırmada tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yapıldığı İmamoğlu (Adana) ilçesi ile Mercimek ve Dikilitaş mahalleleri arasında bulunan topraklardaki ağır metal miktarlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanını temsil edecek 29 noktadan 39 adet toprak örneği alınmıştır. Atomik absorpsiyon spektrometre yöntemi ile Hg, Pb, Cd, Cr, Zn, Cu, Ni, Co, As, Mn ve Fe element analizleri yapılmıştır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) toprak standartlarına göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Nikel (Ni) ve Kadmiyum (Cd) elementine ait değerler yüksek çıkmıştır. ArcGis programı ile bu elementlerin bölgedeki mekânsal dağılım haritaları hazırlanmıştır. Antropojen kaynaklı ağır metal miktarlarının etkisini değerlendirebilmek için zenginleşme faktörü (Ef) hesaplamaları yapılmıştır. Bu sonuçlara göre Ni, Co ve Pb elementi için orta zenginleşme gösterirken Cd elementi için çok yüksek zenginleşme göstermektedir. Topraklardaki bu zenginleşmede kullanılan tarımsal ilaçlar ve fosfatlı gübrelerin etkisinin yanısıra Ni elementlerindeki artışta jeolojik birimlerden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Zenginleşme faktörü (Ef), Ağır metal, Toprak kirliliği, CBS, İmamoğlu

### Evaluation of Heavy Metal Contents in Soils Between İmamoğlu, Dilekkaya and Mercimek (Adana) According to Enrichment Factor

#### Abstract

In this research, it was aimed to determine the amount of heavy metals in the soil between İmamoğlu (Adana) district, where agricultural activities are intense, and Mercimek and Dikilitaş neighborhoods. 39 soil samples were taken from 29 points to represent the study area. Hg, Pb, Cd, Cr, Zn, Cu, Ni, Co, As, Mn and Fe elemental analyzes were carried out using the atomic absorption spectrometry method. The results were compared according to the soil standards of the World Health Organization (WHO). The values of

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Mustafa AKYILDIZ, [akyildizm@cu.edu.tr](mailto:akyildizm@cu.edu.tr)

Nickel (Ni) and Cadmium (Cd) elements were high. Spatial distribution maps of these elements in the region were prepared with the ArcGis program. Enrichment factor (Ef) calculations were made to evaluate the effect of anthropogenic heavy metal amounts. According to these results, while it shows medium enrichment for Ni, Co and Pb elements, it shows very high enrichment for Cd element. In addition to the effects of pesticides and phosphate fertilizers used in this enrichment in the soil, it is thought that the increase in Ni elements may be due to geological units.

**Keywords:** Enrichment factor (Ef), Heavy metal, Soil pollution, GIS, İmamoğlu

## 1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın başından itibaren dünya nüfusundaki hızlı artış ile birlikte daha fazla gıda ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Modern tarıma geçilerek daha fazla ürün alınmak istenmesi ile tarımsal faaliyetlerde aşırı gübre ve ilaç kullanımı artmıştır. Bununla birlikte sanayileşmenin artması sonucunda ortaya çıkan katı ve sıvı atıkların kanalizasyon sularına karışması, maden arama faaliyetleri, fosil yakıt kullanımı ve özellikle hızlı nüfus artışı ile toprak kirliliği ciddi boyutlara ulaşan önemli bir çevre problemi haline gelmektedir.

Adana şehir merkezinin doğusunda bulunan çalışma alanında yoğun tarım ve Bahçecilik faaliyetleri yapılırken sanayii alanları da bu bölgeye doğru kaymaktadır. İmamaoğlu İlçesinin 347,5 km<sup>2</sup>'lik kısmı tarım arazisi olup, bu alanın 200 km<sup>2</sup>'lik kısmı tamamen ovada bulunmaktadır. Bölgenin Kuzeyindeki Kozan civarında Akyıldız [1] yaptığı çalışma dışında toprak kirliliğine yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Batıda İmamoğlu ilçesi, Güneyde Mercimek ve Kuzeydoğu da ise Dilekkaya mahallerinin arasında kalan çalışma alanında belirlenmiş 29 noktadan toplam 39 adet toprak örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Alınan örnekler üzerinde Hg, As, Ni, Cd, Co, Zn, Pb, Cr, Mn, Al, Fe element analizleri Atomik Absorbsiyon cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara ait semboloji ve dağılım haritaları Arcgis programı ile yapılmıştır. Ayrıca topraklardaki ağır metallerin kirlilik boyutlarını saptamak için Zenginleşme faktörü hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre çalışma alanı içerisinde ağır metallere kaynaklanan bir kirliliğin olup olmadığı araştırılmıştır.

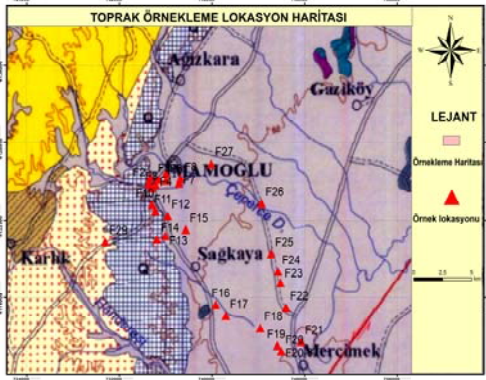


Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Bölgenin jeolojisi, arazinin konumu, zirai faaliyetler dikkate alınarak örnek lokasyonları belirlenmeye çalışılmıştır. 29 noktadan 39 adet örnek alınmıştır. 10 adet örnek ( F8, F9, F11, F20, F22, F23, F24 ve F26 nolu noktalarda) DSİ tarafından açılan kanal çukurlarının bulunması sonucunda farklı (0-1-2m) derinliklerinden alınan örneklerden oluşmaktadır (Şekil 2). Toprağının üst yüzeyinden 10-15 cm'lik kısmı atıldıktan sonra yaklaşık 500 gr ile 1 kg arası toprak örneği alınmıştır.



Şekil 2. Örnek lokasyonları.

## 2.2. Metot

Toprak numuneleri ilk olarak nemi alınması amacıyla kurutulmuş ve kurutulan bu numuneler 0,1mm'lik elekten geçirilmiştir. Çözelti hazırlanması için 1 gr'lık numunelerin üzerine 15 ml HCl ve 5 ml litre HNO<sub>3</sub> ilave edilmiş, toplamda 20 ml'lik çözelti elde edilmiştir. Hazırlanan bu çözelti, fırında 300°C'de ısıtılmış ve bu ısıtma işlemi, tepkime başlayana kadar devam etmiştir. Tepkimenin ardından fırından alınan çözelti, balon jöjeler içerisine boşaltılmış ve üzerine, toplam derişim 150 ml oluncaya kadar deiyonize su eklenmiştir. Daha sonra örneklerin ağır metal analizleri Atomik Absorbsiyon Spektrometre cihazı ile yapılmıştır.

Analiz sonuçları Dünya sağlık örgütü ve Dünya Tarım örgütünün standartlarının kullanıldığı[2] değerlerden yararlanılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Dünya sağlık örgütü ve Dünya tarım örgütünün kirlilik sınırları [2].

Elementler	Dünya Sağlık Örgütü (WHO)/ Dünya Tarım Örgütü (FAO) (µg/g)
As	20
Cd	3
Co	50
Cr	100
Cu	100
Fe	50000
Mn	2000
Ni	50
Pb	100
Zn	300
Hg	-

Zenginleşme Faktörü (Ef); belirli bir zaman dilimi içerisinde değişik çevresel ortama bağlı kirlilik değerlendirmelerinde veya ağır metal kirliliğinin insan kaynaklı meydana geldiği durumların hesaplanmasında yaygın olarak tercih edilen bir değerdir[3]. Bu faktör değerlendirilmesi yapılırken diğer kirlilik indekslerinden farklı olarak; referans bir element seçilmekte ve normalleştirme yapılmaktadır.

Normalleştirme işleminde kullanılacak metal ile ilgili kesin bir standart veya kabul yoktur. Genellikle Fe, Li, Al, Ti gibi jeokimyasal açıdan aktif olmayan ve tane yapısı ince taneli olan materyallerde rahatlıkla rastlanabilen elementler tercih edilmektedir[4]. Bu araştırmada Fe elementi kullanılmıştır. Zenginleşme faktörü aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmektedir. Sonuçlar Çizelge 2 de verilen sınıflamaya göre değerlendirilmektedir.

$$EF = \frac{C_n / C_{ref} \text{ (örnek)}}{B_n / B_{ref} \text{ (referans)}}$$

C<sub>n</sub>; Metalin analizi yapılan örnekteki değeri,  
C<sub>ref</sub>; Referans metalin analizi yapılan örnekteki değeri,  
B<sub>n</sub>; İncelenen metalin yer kabuğundaki ortalama değeri (Çizelge 2),  
B<sub>ref</sub>; Referans metalin yer kabuğundaki ortalama değeri (Çizelge 2)

Çizelge 2. Zenginleşme faktörü (Ef) sınıflaması [5].

Ef < 2	Minimal Zenginleşme
2 ≤ Ef ≤ 5	Orta Zenginleşme
5 < Ef ≤ 20	Belirgin Zenginleşme
20 ≤ Ef ≤ 40	Çok Yüksek Zenginleşme
Ef > 40	Aşırı Zenginleşme

## 3. BULGULAR

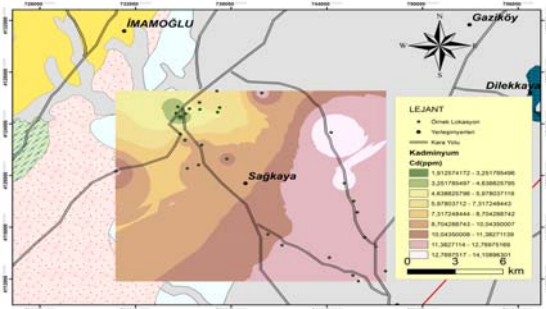
### 3.1. Toprak Analiz Sonuçları

Atomik Absorbsiyon Spektrometre cihazı ile örnekler üzerinde As, Hg, Ni, Cd, Co, Cr, Pb, Zn, Fe, Mn, Al element analizi yapılmıştır. Dünya

Sağlık Örgütü (WHO ) ve FAO standartları ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre As, Co, Zn ve Cu, Hg, Pb, Mn, Fe, elementlerinden kaynaklı bir ağır metal kirliliği olmadığı saptanmıştır. Ni, Cd ve Cr elementi açısından değerler standartların üzerinde bulunmuştur (Çizelge 3).

#### Krom (Cr)

Krom (Cr) elementi 39 örnek içerisinde 6 örnekte standart değerlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. İmamoğlu ve çevresindeki topraklardan alınan örnekler incelendiğinde tespit edilen en yüksek Cr değeri 217 ppm, en düşük değeri 16,6 ppm ve (Çizelge 3)(Şekil 4).

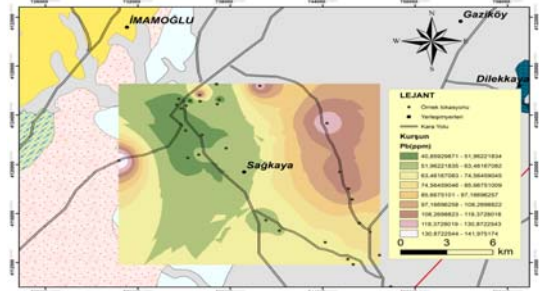


Şekil 4. Cr elementinin dağılımını gösteren haritası

#### Kurşun (Pb)

Örnekler içerisinde en yüksek kurşun değeri 142 ppm, en düşük değeri 39,7 ppm, ortalaması 71,969 ppm olarak saptanmıştır (Çizelge 3).

Analiz sonuçlarına göre Pb'nin dağılımı düzensiz ve oldukça düşük olup, WHO standartlarına göre büyük bir çoğunluğunda limit değerlerin altında sonuç vermiştir (Şekil 5). Dağılım haritaları incelendiğinde Pb'nin düzensiz dağılımı ve dağılım oranlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Pb miktarının en çok tespit edildiği yerler ise ulaşım hatları ve yerleşim yerleri çevresi olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Çalışma alanı topraklarındaki Pb elementinin dağılım haritası (Arcgis-10.8).

Çizelge 3. Adana şehir merkezi ve çevresinden alınan 29 noktaya ait 39 analiz sonuçları (DL:Dedeksiyon limiti)

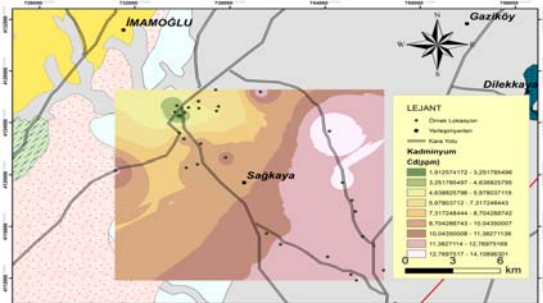
İmamoğlu İlçesi ve yakın çevresinin ağır metal analiz sonuçları											
Örnek no	Hg (ppb)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Cr (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	As (ppb)	Mn (ppm)	Fe (%)
F1	26,05	48,9	3,487	80,6	62,15	30,48	188,9	33,44	6290	834,3	3,178
F2	15,01	43,8	4,923	54,6	53,75	25,93	155,5	34,55	4929	637,4	2,479
F3	<DL	45,1	1,893	169	67,29	30,36	186,3	35,83	3840	973,9	3,863
F4	18,94	60,4	3,651	95	61,44	25,6	162,7	37,14	5387	678,9	3,232
F5	53,76	41,8	6,173	48,9	59,23	25,03	172,7	24,32	4358	704	2,569
F6	19,62	50,5	5,458	163	64,73	31,32	172,2	30,14	4297	729,7	3,011
F7	20,83	55,7	5,906	92,3	63,55	31,83	195,6	30,94	2499	722,4	3,276
F8-1	27,51	45,6	5,53	32,2	52,36	24,97	181	32,4	4049	686,1	2,619
F8-2	18,41	39,7	6,382	29,1	62,3	22,71	171,8	33,12	4701	392,6	2,525
F8-3	24,49	45,9	6,408	37,1	58,99	24,66	177	39,15	5860	685,2	2,595
F9-1	20,89	51	5,983	55,1	68,12	30,61	224,5	49,53	4744	757	3,159
F9-2	91,15	49,7	7,19	49,3	56,87	25,68	212,6	38,76	6238	700,5	2,909
F10	12,34	40,8	7,15	51,6	57,64	19,02	147,6	35,88	5083	752,6	2,985
F11-1	12,33	41,5	8,405	38,8	59,66	20,25	151,7	34,29	3367	716,4	2,723
F11-2	19,18	42	9,657	25	52,28	19,32	174,1	38,98	4949	689,7	2,558

Çizelge 3. (Devamı)

F12	35,25	48,9	9,375	103	60,87	20,37	167	31,77	5412	862,6	3,248
F13	27,1	56,5	9,777	29,7	48,09	12,77	128,4	25,42	5484	724,8	2,296
F14	35,48	44	8,671	99,6	47,97	14,91	141,3	34,39	6150	800,8	2,968
F15	41,2	56,6	10,62	31,1	56,7	15,28	126,5	37,19	5265	550,7	2,283
F16	<DL	59,5	10,09	43,4	100,1	33,66	131,4	32,37	3470	692,3	2,158
F17	18,48	62,7	11,79	62,1	58,56	19,65	162	33,08	5494	593,7	2,668
F18	4,625	68,9	12,2	26	42,79	14,34	144,5	27,99	4456	587,1	2,019
F19	18,38	76,1	11,92	82,2	80,17	22,79	182,5	34,71	5660	618,1	3,058
F20-1	32,25	73,6	12,27	32,9	60,37	13,46	156,5	26,97	4706	614,9	2,423
F20-2	<DL	81,4	12,95	34,7	37,72	10,77	144,4	36,51	5930	650,2	1,924
F20-3	32,24	66,8	12,89	53,1	51,19	16,86	177,4	41,34	6194	633,5	2,817
F21	31,27	75,4	12,04	36,1	66,85	17,04	150,1	35,8	5443	664,6	2,143
F22-1	0,049	76,3	12,61	171	72,43	24,81	226,6	45,66	5084	620,4	4,173
F22-2	5,349	88,2	12,16	135	74,54	23,17	236,5	44,01	3691	626,2	4,16
F23-1	45,62	97,2	11,95	138	71,52	23,38	224,4	45,01	5769	632,9	3,965
F23-2	3,448	91,3	12,35	217	81,54	21,97	221,8	47,99	6435	631,1	3,884
F24-1	49,94	107	12,39	94	85	27,79	253,2	50,27	3287	780,2	3,728
F24-2	17,38	119	12,68	48,1	51,39	15,36	180,8	41,43	6564	668,5	2,624
F25	40,07	115	12,88	78,6	83,28	26,27	216,3	45,13	6465	726,2	3,019
F26-1	23,44	155	14,18	127	76,6	26,58	246,5	46,43	2967	724,9	3,842
F26-2	19,15	126	14,11	145	74,54	25,84	237,5	42,5	4190	700,2	3,869
F27	0,268	123	11,94	166	76,6	32,28	227	47,74	6132	797,5	3,508
F28	33,36	134	7,972	136	66,92	22,08	202,5	43,27	5592	868,4	3,37
F29	9,452	142	11,55	16,6	51,8	8,733	114,4	44,06	2769	410,4	1,655

## Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum (Cd) elementinin analiz sonuçları içerisinde en yüksek değer 14,18 ppm, en düşük değeri 3,48 ppm ve ortalama kadmiyum değeri ise 9,47ppm olarak belirlenmiştir (Çizelge 3). Tüm değerler standartların üzerinde olup, topraklarda kadmiyum elementi açısından kirlilik bulunmaktadır. Çalışma alanında en yüksek kadmiyum değerleri Sağkaya köyü çevresinde dağılım göstermektedir (Şekil 6).

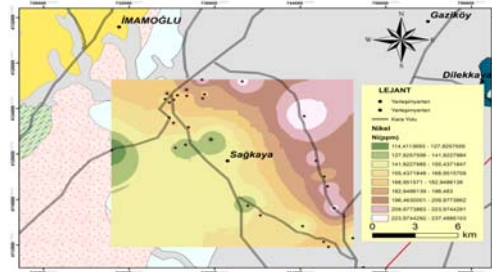


Şekil 6. Cd element dağılım haritası (Arcgis-10.8)

## Nikel (Ni)

Nikel elementi analiz sonuçlarına göre en yüksek Ni değeri 253,2 ppm, en düşük değeri 114,4 ppm ve bütün değerlerin ortalaması 181,38 ppm olarak tespit edilmiştir (Çizelge 3).

Ağır metal toprak kirliliği element analiz sonuçları içerisinde en fazla kirlilik oranına sahip elementin Nikel (Ni) olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanı topraklarındaki Ni elementinin dağılım haritası Şekil 7'de verilmiştir (Arcgis-10.8).



Şekil 7. Çalışma alanı topraklarındaki Ni elementinin dağılım haritası (Arcgis-10.8).

### 3.2. Zenginleşme Faktörü (Ef)

Çalışma alanının antropojen kaynaklı ağır metal miktarlarının etkisini değerlendirebilmek için yapılan hesaplamalar sonucunda; İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek bölgelerinin zenginleşme faktörü (Ef) değerleri: Zn (2,47-0,86); Mn (1,27-0,55), Cu (1,92-0,62) Cr (2,13-0,37), Al (0,12-0,31), As (0,76-0,19) ve Hg elementi (0,67-0,0 ) için minimal zenginleşme olarak belirlenmiştir. Ni (7,06-4,48); Co (2,47-7,10), Pb (1,29-9,47) elementleri için orta zenginleşme; Cd (37,22-2,61) elementi için çok yüksek zenginleşme oranları saptanmıştır (Çizelge 4).

Her element için ayrı ayrı zenginleşme faktörü (Ef) dağılım haritası hazırlanmıştır (Şekil 8). Dağılım haritasında Al ve Cr bölgenin kuzey ve kuzeye yakın kesimlerinde; Mn, As, Cu ve Zn güney kesimlerde; Pb, Cd ve Co elementleri batı kesimlerde; Hg elementi daha çok bölgenin orta kesimlerinde ve Ni elementi ise çalışma alanının doğu kesimlerinde Ef değerleri açısından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8).

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek bölgeleri arasında bulunan toprak örnekleri üzerinde As, Hg, Ni, Cd, Co, Cr, Pb, Zn, Fe, Mn, Al element analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda; 29 noktadan 39 adet örnek alımı yapılmıştır. Analiz sonuçları Dünya sağlık örgütü ve Dünya Tarım örgütünün kirlilik sınır (WHO-FAO) standartları ile karşılaştırılarak kirlilik oluşturup oluşturmadığı ve element birikimleri hakkında bilgi edinilmiştir. Bu sonuçlara göre:

Nikelin topraklarda bulunmasının ana kaynağı dünyanın merkezinde yer alan ergimiş Fe-Ni çekirdeğidir[7]. Ofiyolitik kökenli kayaçların ayrışmasına bağlı olarak oluşan Serpantinleşmiş kayaçların bölge çevresinde var olması da nikelin bir diğer kaynağıdır [8]. Kaynak kayacın içerdiği nikel miktarının, ayrışarak toprağa karıştığı ve buna bağlı olarak topraklardaki nikel oranını artırdığı doğrudan bilinmektedir [9-10]. Ayrıca endüstriyel

faliyetlere bağlı olarak meydana gelen antropojenik kökenli, kirleticiler de (kömür ve yağ yakılması ile çevreye yayılan dumanlar) daha fazla ve daha hızlı ürün almak için yapılan tarım faaliyetlere bağlı olarak kullanılan fosfat gübreleri ve petrol türevi kullanan motorlu taşıtlardan çevreye yayılan emisyonun atmosfer yoluyla topraklara karışması da nikel miktarını arttırmaktadır [8]. Genel olarak topraktaki yüksek nikel oranına etki edecek etkenlerin kümülatif toplamaları göz önünde bulundurulduğunda çalışma alanının kuzeybatısında ofiyolitik kayaçların yüzeylenmesi ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır.

Kurşun, endüstriyel faaliyetlere bağlı çevre kirleticisi olarak ağır metal kirleticilerin ilk sırasında yer almaktadır. Kurşunun topraktaki oranının artmasında insan kaynaklı etkiler doğal kaynaklı etkilere göre oldukça yüksektir. Akaryakıt olarak petrol kullanımı topraklardaki kurşunun doğal emisyonunu arttırmaktadır [11].

Örnekleme yapılan çalışma alanının ulaşım güzergahına yakın yerlerinden alınan topraklarda kurşun değerlerinin yüksek çıkmasında aktif araç trafiğine bağlı kurşun salınımından kaynaklandığı öngörülmektedir. Kurşun elementine fazla maruz kalmak insanda; nörolojik, zeka/IQ (çocuk), kansızlık hipertansiyon gibi hastalıklara neden olmaktadır

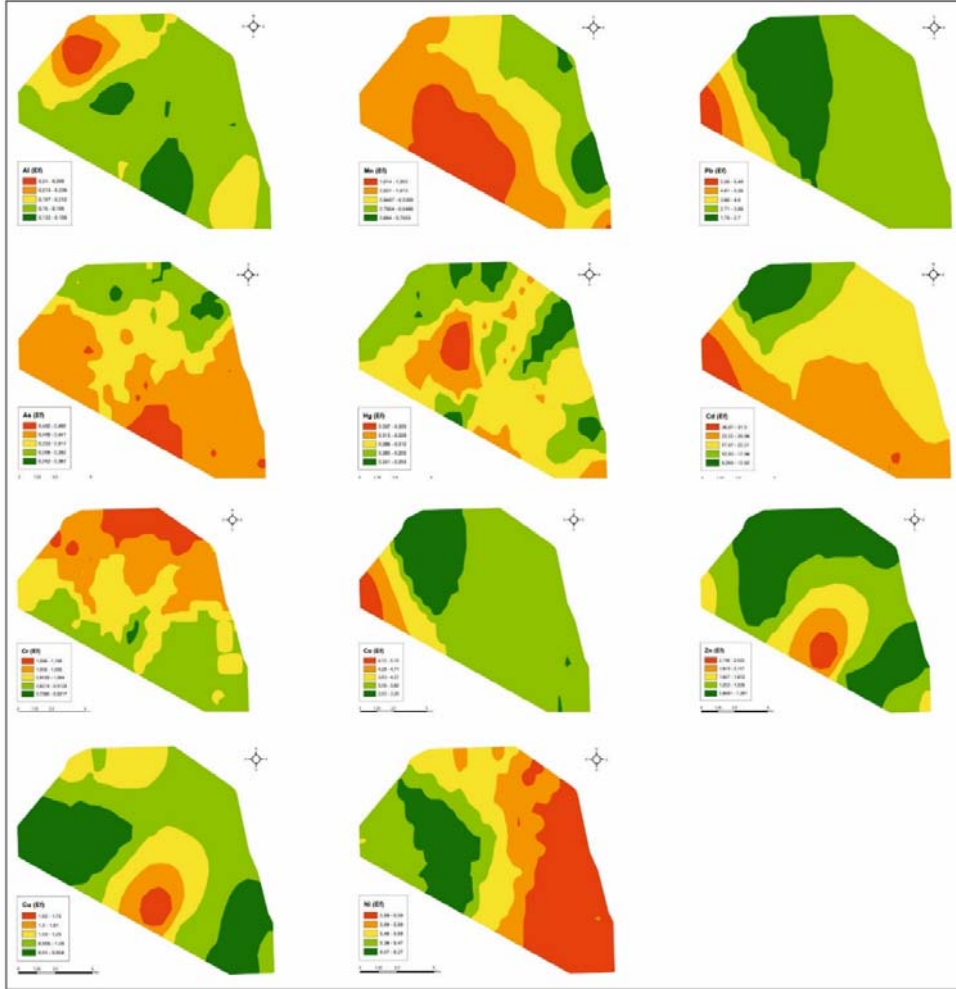
Tarımsal verim artırıcı olarak kullanılan fosfatlı gübre çeşitleri topraklardaki Cd miktarını arttıran en önemli kaynak olarak belirlenmiştir. Fosforlu gübre kullanılması, toprağın A horizonunda zehirleyici yoğunluğunu arttırmaktadır[8]. En yüksek Cd kirliliği ilk 15-20 cm lik derinlikte yoğunlaşmaktadır [10].

Çalışma alanından alınan topraklarda yoğun tarımsal faaliyet yapıldığı ve Cd değerlerinin yüksek olması kullanılan gübrelerden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. İnsan sağlığı açısından Kadmiyum fazlalığı mesane, böbrek, akciğer, hipertansiyon, kalp-damar ve nörolojik değişimlere neden olmaktadır.



Çizelge 4. Çalışma alanının zenginleşme faktörü (Ef) değerleri

EF	Zn	Mn	Cu	Ni	Co	Cd	Cr	Pb	Al	As	Hg
F1	1.04	0.99	1.18	5.59	2.81	5.85	0.97	1.70	0.22	0.49	0.26
F2	1.16	0.97	1.29	5.90	3.72	10.59	0.84	1.95	0.26	0.49	0.19
F3	0.93	0.95	0.97	4.54	2.47	2.61	1.67	1.29	0.31	0.24	-
F4	1.01	0.79	0.97	4.74	3.06	6.02	1.12	2.06	0.28	0.41	0.19
F5	1.23	1.03	1.20	6.33	2.52	12.82	0.73	1.80	0.19	0.42	0.67
F6	1.15	0.91	1.28	5.38	2.67	9.67	2.06	1.85	0.28	0.35	0.21
F7	1.03	0.83	1.20	5.62	2.52	9.61	1.07	1.88	0.25	0.19	0.20
F8-1	1.07	0.99	1.17	6.50	3.30	11.26	0.47	1.92	0.18	0.38	0.34
F8-2	1.32	0.59	1.11	6.40	3.50	13.48	0.44	1.73	0.16	0.46	0.23
F8-3	1.21	0.99	1.17	6.42	4.02	13.17	0.54	1.95	0.17	0.56	0.30
F9-1	1.15	0.90	1.19	6.69	4.18	10.10	0.66	1.78	0.19	0.37	0.21
F9-2	1.04	0.91	1.09	6.88	3.55	13.18	0.65	1.89	0.17	0.53	-
F10	1.03	0.95	0.78	4.65	3.21	12.77	0.66	1.51	0.27	0.42	0.13
F11-1	1.17	0.99	0.92	5.24	3.36	16.46	0.54	1.68	0.27	0.30	0.14
F11-2	1.09	1.02	0.93	6.41	4.06	20.13	0.37	1.81	0.23	0.48	0.24
F12	1.00	1.00	0.77	4.84	2.61	15.39	1.21	1.66	0.15	0.41	0.35
F13	1.12	1.19	0.68	5.26	2.95	22.71	0.49	2.72	0.13	0.59	0.38
F14	0.86	1.02	0.62	4.48	3.09	15.58	1.28	1.64	0.14	0.51	0.38
F15	1.32	0.91	0.82	5.22	4.34	24.81	0.52	2.74	0.12	0.57	0.58
F16	2.47	1.21	1.92	5.73	4.00	24.94	0.77	3.04	0.12	0.40	NA
F17	1.17	0.84	0.91	5.71	3.31	23.57	0.89	2.59	0.12	0.51	0.22
F18	1.13	1.09	0.87	6.74	3.70	32.23	0.49	3.77	0.22	0.54	0.07
F19	1.40	0.76	0.92	5.62	3.03	20.79	1.02	2.75	0.22	0.46	0.19
F20-1	1.33	0.96	0.68	6.08	2.97	27.01	0.52	3.35	0.19	0.48	0.43
F20-2	1.05	1.27	0.69	7.06	5.06	35.90	0.69	4.67	0.20	0.76	-
F20-3	0.97	0.85	0.74	5.93	3.91	24.40	0.72	2.62	0.19	0.54	0.37
F21	1.66	1.17	0.98	6.59	4.45	29.96	0.64	3.88	0.18	0.63	0.47
F22-1	0.93	0.56	0.73	5.11	2.92	16.12	1.56	2.02	0.20	0.30	0.00
F22-2	0.96	0.57	0.69	5.35	2.82	15.59	1.24	2.34	0.20	0.22	0.04
F23-1	0.96	0.60	0.73	5.33	3.03	16.07	1.33	2.71	0.21	0.36	0.37
F23-2	1.12	0.61	0.70	5.37	3.29	16.96	2.13	2.59	0.19	0.41	0.03
F24-1	1.22	0.79	0.92	6.39	3.60	17.73	0.96	3.17	0.16	0.22	0.43
F24-2	1.04	0.96	0.72	6.48	4.21	25.77	0.70	5.00	0.12	0.62	0.21
F25	1.47	0.91	1.07	6.74	3.99	22.75	0.99	4.20	0.15	0.53	0.42
F26-1	1.06	0.71	0.85	6.04	3.22	19.68	1.26	3.30	0.20	0.19	0.20
F26-2	1.03	0.68	0.82	5.78	2.93	19.45	1.43	3.59	0.18	0.27	0.16
F27	1.16	0.86	1.13	6.09	3.63	18.15	1.80	3.87	0.18	0.43	0.00
F28	1.06	0.97	0.81	5.66	3.42	12.62	1.54	4.39	0.19	0.41	0.32
F29	1.67	0.93	0.65	6.51	7.10	37.22	0.38	9.47	0.15	0.41	0.18



Şekil 8. İmamoğlu, Dilekkaya ve Mercimek bölgesinden alınan topraklardaki elementlerin Zenginleşme Faktörü (Ef) dağılım haritası

Mafik-Ultramafik kayalardan ve özellikle ayrışma sonucu meydana gelen serpantinlerden türeyen topraklarda yüksek miktarlarda krom bulunmaktadır[12]. Bir diğer krom kirlilik etmeni ise endüstriyel faaliyetler, foseptik giderleri ve toprak zenginleştirme yöntemleridir [7]. Alınan toprak örneklerinin birçoğunda krom değerlerinin yüksek çıkmasının sebebi bölge topraklarının, ofiyolit kökenli olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Krom elementinin fazla alımı böbrek, karaciğer, akciğer hastalıklarına yol açmaktadır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri koordinasyon birimi tarafından FYL-2114249 proje no'lu desteklenmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Akyıldız, M., Savaş, M., Karataş, B., 2023. Kozan, Dikilitaş ve Alapınar (Adana) Arasında Bulunan Topraklardaki Ağır Metal İçeriklerinin

- Jeobirikim İndeksine Göre İncelenmesi. *Geosound*, 2023, 58(1) 1-19
2. Chiroma, T.M., Ebewele, R.O., Hymore F.K., 2014. Comparative Assessment of Heavy Metal Levels in Soil, Vegetables and Urban Grey Waste Water used for Irrigation in Yola and Kano. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 3(2), 1-9.
  3. Türkoğlu, B., 2006. Toprak Kirlenmesi ve Kirlenmiş Toprakların Islahı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Anabilim Dalı, Adana, 134.
  4. Adriano, D.C., 2001. Soils: Their Implications to Human Health. *Science of the Total Environment*, 291, 1-32.
  5. Galuszka, A., Migaszewski, Z.M. ve Zalasiewicz, J., 2014. Assessing the Anthropocene with Geochemical Methods. *Geological Society, London, Special Publications*, 395(1), 221-238.
  6. Buat-Menard, P., Chesselet, R., 1979. Variable Influence of Atmospheric Flux on the Trace Metal Chemistry of Oceanic Suspended Matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 42, 398-411.
  7. Alloway, B.J., 2013. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Third Edition. *Environmental Pollution* 22, Springer Science+Business Media Dordrecht. Reading, UK. 613.
  8. Akyıldız, M., Karataş, B., 2018. Adana Şehir Merkezindeki Topraklarda Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(2), 199-214.
  9. Chen, Y.C., Chen, M.H., 2001. Heavy Metal Concentrations in Nine Species of Fishes Caught in Coastal Waters of Ann-Ping. *Journal of Food and Drug Analysis*, 9 (2), 107-114.
  10. Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B., 2007. Trace Elements From Soil to Human. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 550.
  11. Campbell, P.G.C., Stokes, P.M., Galloway, J.N., 1983. Effects of Atmospheric Deposition on the Geochemical Cycling and Biological Availability of Metals. In: *Proceedings of the International Conference on Heavy Metals in the Environment*, 6-9 September 1983, Heidelberg, 760-763.
  12. Adriano, D.C., 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments (2nd ed.). New York: Springer.



## Vaporizing Foil Actuator Welding Arc Problems and Precautions

Ganime Tuğba ÖNDER\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-7504-7394

Mustafa Kemal KÜLEKÇİ<sup>2</sup> ORCID 0000-0002-5829-3489

<sup>1</sup>Çukurova University, Adana Vocational School, Department of Electricity and Energy, Air Conditioning and Refrigeration Technology Program, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mersin, Türkiye

Geliş tarihi: 26.07.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ÖNDER, G.T., KÜLEKÇİ, M.K., (2024). Vaporizing Foil Actuator Welding Arc Problems and Precautions. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 39(1), 261-269.

### Abstract

The management of the "arc" has an important place in welding methods made with electric discharge and in cases where the arc is not managed correctly, important technical and environmental problems may occur. Vaporizing foil actuator welding (VFAW) is a novel welding method developed particularly for joining metals and operates on the principle of electrical discharge. This study describes the welding prototype of vaporizing foil actuator welding and outlines technical changes made during the increase in energy levels. The locations, causes, preventive interventions, and solution proposals for arc problems occurring during the welding process are addressed. Welding operations must be carried out safely and comprehensively. Alongside the welding method, potential safety issues should be identified. Necessary precautions must be taken before, during, and after welding. The safety of the welding method can be ensured by eliminating specific risks.

**Keywords:** Solid state welding, Vaporizing foil actuator welding, Arc, Welding safety

### Buharlaştırılmış Folyo Aktüatör Kaynağı Ark Problemleri ve Önlemleri

#### Öz

Elektrik deşarjı ile yapılan kaynak metodlarında "ark"ın yönetilmesi önemli bir yere sahiptir ve ark doğru yönetilemediği durumlarda önemli teknik ve çevresel problemler meydana gelmektedir. Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı, özellikle metallerin birleştirilmesi için geliştirilmiş yeni bir kaynak yöntemidir ve elektrik deşarjı prensibi ile çalışır. Bu çalışmada, imal edilen buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağının, kaynak prototipi anlatılmakta ve enerji seviyesinde artırıma gidilirken yapılan teknik değişiklikler ortaya konulmaktadır. Kaynak yöntemi uygulanırken meydana gelen ark problemlerinin yerlerine, nedenlerine, önleyici müdahalelere ve çözüm önerilerine yer verilmiştir. Bir kaynak işlemi gerçekleştirilirken güvenle yapılması ve bütüncül olarak ele alınması gerekmektedir. Kaynak yöntemi ile beraber, güvenlik problemlerinin hangi noktalarda oluşabileceği ortaya konulmalıdır. Gereken tedbirler kaynak öncesi,

---

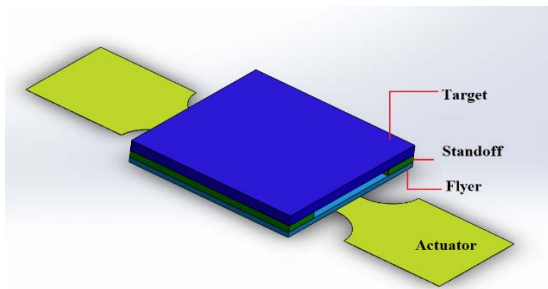
\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Ganime Tuğba ÖNDER, [gercoskun@cu.edu.tr](mailto:gercoskun@cu.edu.tr)

kaynak sırasında ve kaynak sonrasında mutlaka alınmalıdır. Kaynak yönteminin güvenliği, belirli risklerin ortadan kaldırılması ile mümkün kılınabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Katı hal kaynağı, Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı, Ark, Kaynak güvenliği

## 1. INTRODUCTION

An electric arc occurs when current flows between two conductors, this is especially observed when metals form a short gap [1,2]. A short electrical pulse and simultaneous application of pressure cause high-speed deformation of the contact zone [3]. Magnetic Pulse Welding (MPW) technologies, can create a shaping in the weld area, as well as cause undesirable deformations in a manufacturing process that cannot be carried out correctly.



**Figure 1.** VFAW Basic System Components

Vaporizing foil actuator welding (VFAW) is a new solid-state welding technology making uses the impulse created by the vaporization of the metallic foil or wire by the passage of a high current [4-6]. It belongs to the magnetic pulse source family [7,8]. In this process, an aluminum foil is placed over the flyer sheet to generate the kinetic energy for impact. A pulse of electric current generated by a capacitor bank is applied to the foil. As a result, the active region of the foil evaporates rapidly and the resulting expanding gas hurls the flyer toward the target plate at high speed [9,10]. VFA technology is used to join metals such as Al-Fe, Al-Mg, Al-Cu, Al-Ti and has an open horizon [5,11-14]. Figure 1 shows the basic application stack for the VFAW technique. Each superimposed element also creates the basic system parameters for VFAW.

It is impossible to completely prevent arcing in electrical systems. However, with precise

identification of all elements of the system and operating conditions, it can be minimized or kept within a safe range. This study aims to make a welding machine prototype to realize VFAW, a new welding technique in the manufacturing field, and to contribute to the technique through this prototype.

For this, possible locations of arc problems, which is an important event on the prototype, were determined and preventive suggestions were made.

## 2. EXPERIMENTAL METHOD

In the present study, 0.1 mm thick high-purity aluminum alloy and 0.7 mm thick 1050 aluminum alloy were selected as weld metals. Samples measuring 50 mm x 50 mm for both flyer and target were sanded, cleaned with acetone, and dried before welding. The material used as a standoff is two support elements measuring 10 mm x 50 mm.

A three-phase power unit is used to convert AC current to DC current and transfer energy to a capacitor bank called a capacitor module. Gradual charging is based on the capacitors in order to avoid damage and to have a longer life. Pneumatic switches are switches and fasteners used to convert pneumatic energy into mechanical energy. There are two pistons on the system, these elements are remotely controlled by means of a directional control valve. Pneumatic power was provided by a 2.5 HP-8 bar air compressor. To control the discharge process between the capacitor bank of a double-acting pneumatic piston with a diameter of 40 mm and a stroke length of 300 mm and the fixture terminals (piston 1); On the other hand, the pneumatic piston (piston 2) with a stroke length of 25 diameters 100 mm was used to control the process of directing the energy remaining on the system to the grounding line after the welding process. Capacitors are connected to the grounding line via the second pneumatic switch after discharge (Figure 2).

The fixture is a protection and support zone that holds the basic system elements together. It also minimizes workpiece deformation due to clamping and cutting forces [15]. Fixtures have been specially designed and manufactured for this study. While designing the fixture, attention was paid to allowing different sizes of materials to be welded and to remain balanced on the pedestal. Here, a preliminary design suitable for the welding method,

geometric and strength analysis, project design, and then manufacturing comes [16-18].

In order to protect the welding process, system elements, welding personnel, and the environment from dangerous voltages, grounding is performed. This stage is one of the most important steps for the operation of electrical systems [19,20].

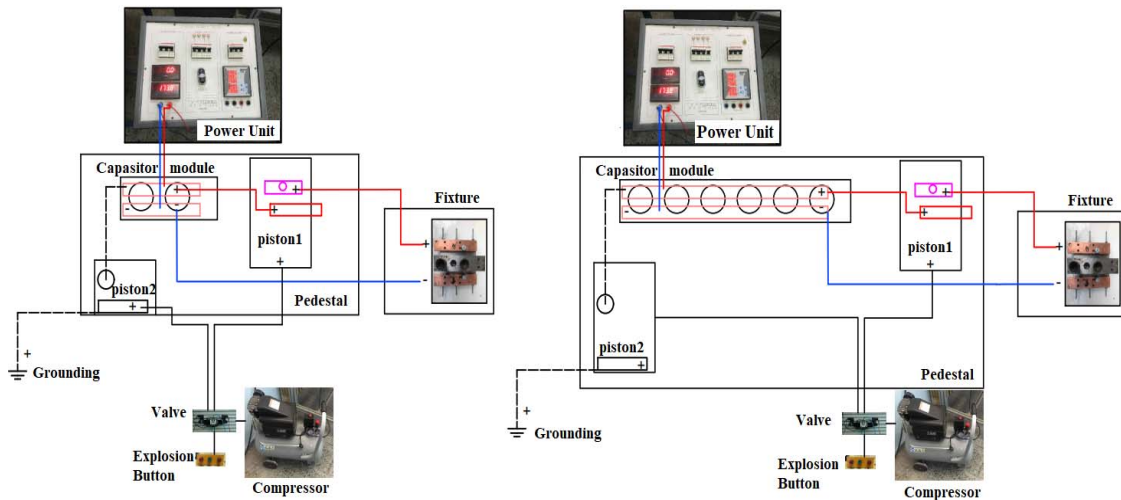


Figure 2. Reinforcement of the VFAW prototype

Table 1. Capacitor specifications

Capacitor	R	L	C	Nominal short circuit current rise time (us)	Max charge voltage (kV)	Max charge energy (kJ)
	Impedance ( $\Omega$ )	Internal inductance (H)	Capacitance (F)			
	0.01	0.00000002	0.010	6.55	0.045	1.0125

The number of capacitors has been increased in order to increase the efficiency of the aluminum foil used as the actuator on the materials to perform the welding and to work in a wider range. By adding 4 more DC capacitors, which were used 2 at the beginning, the number was increased to 6, thus strengthening the input energy conditions of the welding prototype (Figure 2). The characteristics of the capacitors used during the experiments are given in Table 1.

Metal samples were welded at variable power settings at an energy input ranging between 2 kJ and 6 kJ. Welded samples were examined in SEM analysis.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

An arc can occur when one piece of metal collides with or makes electrical contact with another. Arc problems that may occur during applications include negative aspects for all components,

especially welding metals and capacitors, as well as for the environment. Due to arc formation and splashes, the entire system and its physical environment should be kept at a safe distance, and materials (cloth, plastic, chemical liquids, cleaning fluids, oil, cleaning cotton/cloths, etc.) that are at risk of burning and explosion should never be kept in the same environment as the test area. Both capacitors and all other components carrying electricity should be physically and electrically avoided.

As a result of the risk analysis, it is clear that the VFAW technique is in the dangerous risk group,

especially due to electrical phenomena [21]. At the point where an arc occurs, it causes both energy loss and material damage and burning. For this reason, arc formation is an undesirable and problematic situation in the VFAW process [22]. The measure taken for each port is different from the other. Below are the six regions where arcing occurs most frequently on the prototype created for VFAW, and the causes, preventive interventions, and solution suggestions for these situations. These regions will be detailed over the technical changes made when the number of capacitors is increased from two to six



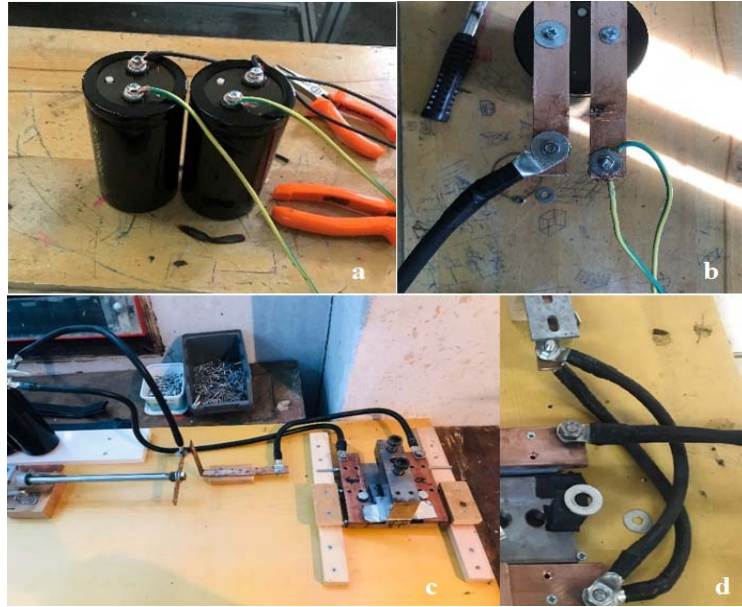
Figure 3. 1st Arc-Zone

**The 1st region;** these are the connection points of the capacitor + and - terminals with the copper busbar. It is important that the detachable connection is not loose in the use of screws and washers that connect the capacitor terminals with the busbar. It is necessary to pay attention to the fact that the connection points are properly tightened so as not to cause arcing [23,24].

The copper busbars, which are 20 mm x 3 mm for two 450 V capacitors on the prototype (Figure 3a), which collect and distribute the electrical energy,

are strengthened with 40 mm x 4 mm wide and thick copper bars (Figure 3b) when the number of capacitors is increased to 6. The strengthening process should be done according to the current carrying capacity of copper busbars. In addition, a plastic insulation material is used vertically in order to solve the arc jump problem between the + - terminals that are close to each other (Figure 3b). The + and - terminals, which are in the case of two conductor ends, the electric current transition that occurs spontaneously with the ionization of the air, is thus prevented.

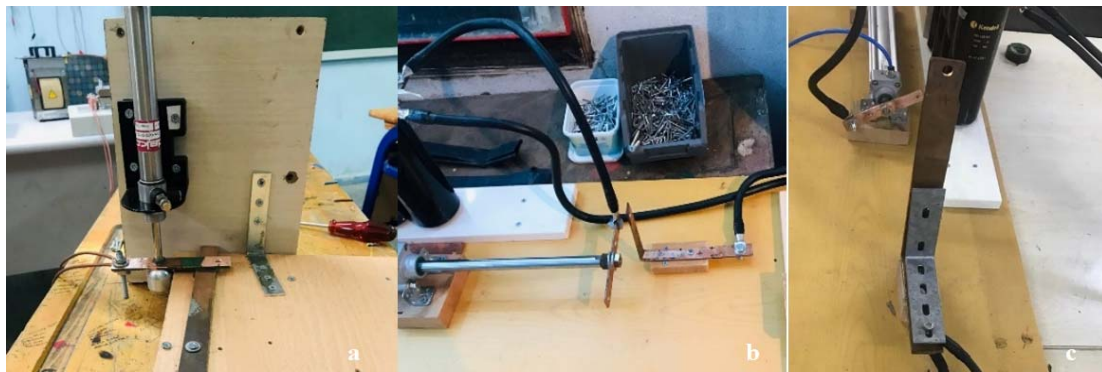




**Figure 4.** 2nd Arc-Zone

**The 2nd region;** copper busbar and cable connection points. Thin-section transmission cables used for the two-capacitor prototype were replaced with thick voltage cables in the six-capacitor application (Figure 4a,b). In addition, the energy load carrying area has been increased by laying all single-line voltage cables in the copper busbar-

terminal connection points in the double-line form. All connection points were checked more frequently to prevent dissolution (Figure 4c,d). Proper grounding on a system is critical for the safe and sound operation of the system [22,25,26]. The system and basic elements are secured by grounding.



**Figure 5.** 3rd Arc-Zone

**The 3rd region;** is the switch connection between the movable copper busbar on the piston and the fixed busbar. The copper bar at this point has been replaced with a thick and wide one (Figure 5a,b). The fixed copper piece is protected from flexing

during impact by an L-shaped support plate (Figure 5c). In addition, if there is a need for contact points between each experiment, they were mechanically leveled and the surface was cleaned with liquid chemicals to be free from the oxide layer [27-29].

Acetone was used for all surface cleaning processes. In this way, surface irregularities that may occur due to deformation are prevented from creating arcing problems.

**The 4th region;** is at the point where the foil inlets and outlets are in the fixture area. Here the distance from the terminal is made as protected as possible [30-33]. The importance of insulation is obvious during the experiments with both two capacitors and six capacitors. The tape used for this situation; should be usable in electrical and thermal insulation [6]. In order to protect the welding materials, which may be affected by the arc heat and the

instantaneous pressure of the jet formed during VFAW, the insulating tape was used in a wider area not only between the fixtures (Figure 6a) but also in the area between the fixture and the copper terminals (Figure 6b).

**The 5th region;** is the distance between the fixture bodies and the copper bars. Here, the frontal surfaces of the fixtures, especially those facing the copper bars, should be protected with insulation tape (Figure 7). Especially since the efficiency increases at the voltage value where six capacitors are used, arc jump problems are more common. For this reason, distance and insulation are also important at these points.

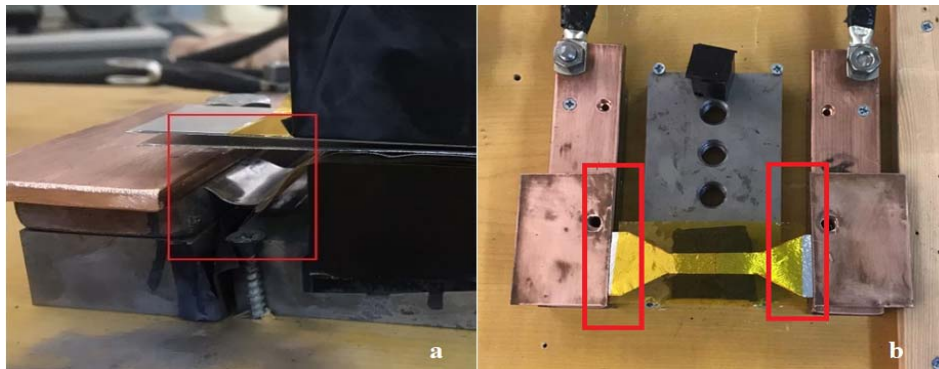


Figure 6. 4th Arc-Zone

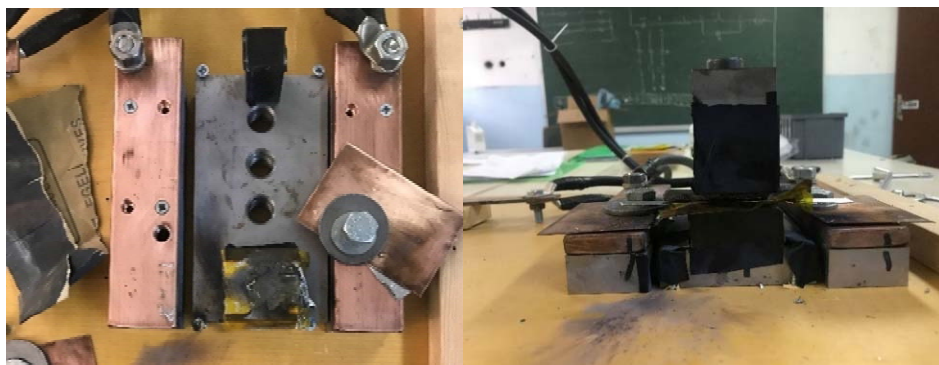
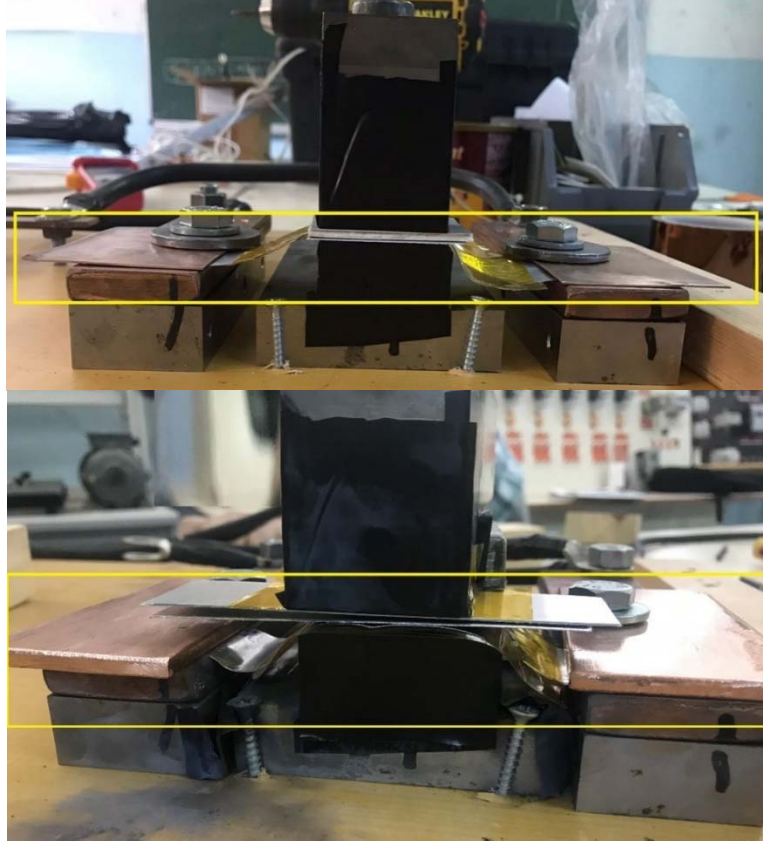


Figure 7. 5th Arc-Zone

**The 6th zone;** is the contact point of the foil actuator with the copper busbar. In this region, thin copper pressure plates have been replaced with thick ones to ensure full and gapless contact with the foil actuator (Figure 8). In this way, full contact

with the aluminum foil, which is a thin conductor, can be ensured and arcing is prevented by creating a gap between the two metals during electrical energy transmission.



**Figure 8.** 6th Arc-Zone

#### 4. CONCLUSION

Arc problems are inevitable if necessary precautions are not taken at the six arc points determined on the DC capacitor prototype manufactured to improve the VFAW welding technique. Each case was determined as a result of many trials on the prototype. In addition to the stated precautions of the six arc points, it is also important that all connections are dry and clean, and that the surface roughness, if any, is leveled in order to prevent arc problems. Surface roughness, which may occur during the energy transfer between the contact surfaces, will lead to the unexpected conclusion of the welding process. As with all welding technologies, it is essential to keep the entire system under surveillance before, during, and after the experiment.

All of the above-mentioned arrangements must be taken into account in order for the detonation event to occur in the active region on the foil actuator, which is the weakest point, as it should be. Otherwise, the discharge process will take place at the weakest point and this will damage the system components and the environment. In addition, it will cause the loss of stored energy and the deformation of consumables. Safe and accident-free welding is possible for VFAW. For this, all possible safety measures must be taken in a timely manner for each hardware and installation material.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported within the scope of TÜBİTAK "1002-A Rapid Support Module" within the scope of the project numbered 222M455 and the project numbered INSTITU.21.001 of the Tarsus

University Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit.

## 6. REFERENCES

1. Ayrton, H.M., 2012. *The Electric Arc*, Cambridge University Press, ISBN 978-1-108-05268-9.
2. Kaymaz, Ö., 2014, Kaynak İşlerinde İş Kazası ve İşe Bağlı Sağlık Problemlerine Neden Olan Faktörler ve KKD Kullanımının Bu Faktörlere Etkileri Üzerine Çevresel ve Teknik Araştırma. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi/Araştırma. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, 3, Ankara.
3. Grigoryev, E.G., 2011. High Voltage Electric Pulse Welding of Titanium with Stainless Steel. *Machines, Technologies, Materials*, 8, 8-10.
4. Vivek, A., Hansen, S.R., Liu, B.C., Daehn, G., 2013. Vaporizing Foil Actuator: A Tool for Collision Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 2304-2311.
5. Su, S., Chen, S., Mao, Y., Xiao, J., Vivek, A., Daehn, G., 2019. Joining Aluminium Alloy 5A06 to Stainless Steel 321 by Vaporizing Foil Actuators Welding with an Interlayer. *Metals*, 9(1), 43.
6. Hahn, M., Weddeling, C., Taber, G., Vivek, A., Daehn, G. S., Tekkaya, A.E., 2016. Vaporizing Foil Actuator Welding As a Competing Technology yo Magnetic Pulse Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 8-20.
7. Aizawa, T., Kashani, M., 2004. Magnetic Pulse Welding (MPW) Method for Dissimilar Sheet Metal Joints. 57th Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), 8.
8. Sarvari, M., Abdollah-zadeh, A., Naffakh-Moosavy, H., Rahimi, A., 2019. Investigation of Collision Surfaces and Weld Interface in Magnetic Pulse Welding of Dissimilar Al/Cu Sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, 356-367.
9. Cheng, J., Hu, X., Sun, X., 2020. Molecular Dynamics Study on Interface Formation and Bond Strength of Impact-Welded Mg-Steel Joints. *Computational Materials Science*, 185.
10. Ren, D., Liu, L. 2014. Interface Microstructure and Mechanical Properties of Arc Spot Welding Mg-Steel Dissimilar Joint with Cu Interlayer. *Materials & Design*, 59, 369-376.
11. Liu, B., Vivek, A., Presley, M., Daehn, G., 2018. Dissimilar Impact Welding of 6111-T4, 5052-H32 Aluminum Alloys to 22MnB5, Dp980 Steels and the Structure-Property Relationship of a Strongly Bonded Interface. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 899-907.
12. Liu, B., Vivek, A., Daehn, G.S., 2017. Joining Sheet Aluminum AA6061-T4 to Cast Magnesium AM60B by Vaporizing Foil Actuator Welding: Input Energy, Interface and Strength. *Journal of Manufacturing Processes* 30, 75-82.
13. Nassiri, A., Zhang, S., Lee, T., Abke, T., Vivek, A., Kinsey, B., Daehn, G., 2017. Numerical Investigation of Cp-Ti & Cu110 Impact Welding Using Smoothed Particle Hydrodynamics and Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 558-564.
14. Chen, S., Huo, X., Guo, C., Wei, X., Huang, J., Yang, J., Lin, S., 2019. Interfacial Characteristics of Ti/Al Joint by Vaporizing Foil Actuator Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 73-81.
15. Pachbhai, S.S., Raut, L.P., 2014. A Review on Design of Fixtures. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2(2), 126-146.
16. Eker, B., Türker, M., Tosun, M., 2011. Kaynak Uygulamalarında Kullanılan Fikstür Tasarımında Göz Önüne Alınacak Ana Parametreler, Kaynak Teknolojisi VIII. Ulusal Kongre ve Sergisi, 6.
17. Zhang, Y., Mu, S., 2012. Study of Computer-Aided Design Process and Methods Based on Welding Fixture. *Journal of Computers*, 7(6), 1421-1428.
18. Kumar, K.S., Dharmaraj, M., Thangavel, P., Srikishore, K.A., Sudharsan, R., Vimal, M., 2021. A Critical Review on Fume Extraction System for Pipe and Plate Welding. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1084(1), 012064.

19. Gürsu, B., İnce, M.C., 2007. Genetik Algoritmalar ile Yüksek Gerilim İstasyonlarında Optimum Topraklama Ağı Tasarımı. *Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Fırat Üniversitesi, 19(4), 511-524.
20. Şentürk, E., 2004. Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektirik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 242.
21. Önder, G.T., Külekçi, M.K., 2023. Vaporizing Foil Actuator Welding Prototype Manufacturing and Applications Risk Analysis, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(4), 1079-1091.
22. Mao, Y., Thurson, B., Li, J., Vivek, A., Daehn, G., 2020. High Strength Impact Welding of HSLA 340 to Al 5754 and Application Prototype. 9th International Conference on High Speed Forming, 13.
23. Raja, J., Ajay-D-Vimal Raj, P., Rajasekar, S., 2018. Best Practices in Operation and Maintenance of Distribution Substation Equipment and Auxiliaries. *Practices in Power System Management in India*, 77-107.
24. Matisoff, B., Matisoff, B., 1997. Standard Manufacturing Processes. *Handbook of Electronics Manufacturing Engineering*, 121-254.
25. Mishra, M., Patnaik, B., Biswal, M., Hasan, S., Bansal, R.C., 2022. A Systematic Review on DC-Microgrid Protection and Grounding Techniques: Issues, Challenges and Future Perspective. *Applied Energy*, 313, 118810.
26. Pourmirasghariyan, M., Zarei, S.F., Hamzeh, M., 2022. DC-System Grounding: Existing Strategies, Performance Analysis, Functional Characteristics, Technical Challenges, and Selection Criteria-A Review. *Electric Power Systems Research*, 206, 107769.
27. Kenéz, A.Z., Földes, T., Lublóy, É., 2023. Effect of Surface Cleaning on Seam Quality of Laser Beam Welded Mixed Joints, Case Studies in Construction Materials, 18, e01904.
28. Gaspar, P., Hubbard, C., McPhail, D., Cummings, A., 2003. A Topographical Assessment and Comparison of Conservation Cleaning Treatments. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 294-302.
29. Kambham, K., Sangameswaran, S., Datar, S.R., Kura, B., 2007. Copper Slag: Optimization of Productivity and Consumption for Cleaner Production in Dry Abrasive Blasting. *Journal of Cleaner Production*, 15(5), 465-473.
30. Ecer, G.M., 1980. Magnetic Deflection of the Pulsed Current Welding Arc. *Welding Journal*, 59(6), 99-107.
31. Wenji, L., Liangyu, L., Jianfeng, Y., Peiyu, Y., Xiaohui, L., 2017. Research on the "Jump Sidewall" Behavior and its Signal Characteristics in Narrow Gap P-MAG Welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 1189-1196.
32. Kim, R.H., Choi, G.D., Kim, C.H., Cho, D.W., Na, S.J., 2012. Arc Characteristics in Pulse-GMA Welding with Acute Groove Angles, *Weld. Journal*, 91, 101-104.
33. Reis, R.P., Scotti, A., Norrish, J., Cuiuri, D., 2012. Investigation on Welding Arc Interruptions in the Presence of Magnetic Fields: Welding Current Influence. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(3), 870-876.



## Türkiye'deki Depreme Dayanıklı Betonarme Çerçevesel Bina Tasarımına Retrospektif Bir Bakış

Alper ALDEMİR\*<sup>1</sup> ORCID 0000-0003-2425-9685

Barış ERDİL<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-5282-3568

Ömer Burak YÜCEL<sup>3</sup> ORCID 0000-0001-9297-2939

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

<sup>2</sup>Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van

<sup>3</sup>DAS Construction Experts, Ankara

Geliş tarihi: 05.07.2023

Kabul tarihi: 28.03.2024

Atıf şekli/ How to cite: ALDEMİR, A., ERDİL, B., YÜCEL, Ö.B., (2024). Türkiye'deki Depreme Dayanıklı Betonarme Çerçevesel Bina Tasarımına Retrospektif Bir Bakış. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(1), 271-285.

### Öz

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) ve Kahramanmaraş Elbistan ( $M_w=7.6$ ) depremlerinin, depremlerden etkilenen yapı stokunun üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Bu maksatla, depremlerden en çok etkilenen illerden olan Hatay pilot il olarak seçilmiştir. Bu doğrultuda, deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı dört katlı bir betonarme düzlem çerçeve, binaları temsilen ele alınmış olup, çerçeveyi oluşturan yapısal elemanlar (kolon ve kirişler) 1968, 1975, 1998 ve 2007 Deprem Yönetmelikleri ile 1975, 1984 ve 2000 betonarme standartlarına (TS500) uygun olarak tasarlanmıştır. Ardından; bu çerçevelerin sayısal modelleri oluşturulmuştur. Tasarlanan binalar Hatay ilindeki 11 farklı konumda tanımlanmıştır. Hatay ilinde seçilen farklı konumlar, kaydedilen yer hareketlerinin konumlar arası taşıma işlemine tabi tutulmaması için AFAD'a bağlı TADAS istasyonlarıyla aynı pozisyonda seçilmiştir. İvmeölçerlerden alınan  $2 \times 11$  adet kayıt (Doğu-Batı ve Kuzey-Güney Yatay Bileşenleri) ayrı ayrı uygulanırken kaydedilen düşey ivmelerde numerik analizlerde dikkate alınmıştır. Her bir bina tipi için seçilen 11 farklı konum ve doğrultu dikkate alınarak, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Çalışma kapsamında toplam 88 adet farklı bina tasarımı ve deprem senaryosu için, sismik performanslar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ülkemizde geçmiş yıllarda kullanılmış olan tasarım ve deprem yönetmeliklerine uygun olarak tasarlanmış betonarme çerçevesel orta yükseklikteki binaların sismik dayanımlarının Kahramanmaraş merkezli depremlerde yetersiz kaldığını ve göçme durumunun önlenmesinin mümkün olmadığını ortaya koymuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem, Betonarme, Bina tasarımı, Sismik dayanım

### A Retrospective View on Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Frame Structures in Türkiye

#### Abstract

This study aims to investigate the effects of the February 6, 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) and Kahramanmaraş Elbistan ( $M_w=7.6$ ) earthquakes on the affected building stock. For this purpose, Hatay,

\*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Alper ALDEMİR, [alperaldemir@hacettepe.edu.tr](mailto:alperaldemir@hacettepe.edu.tr)

one of the most affected provinces by these earthquakes, was selected as the pilot province. Accordingly, a four-story reinforced concrete frame, where all seismic loads are carried by the frames, was considered to represent the buildings. The structural elements (columns and beams) forming the frame were designed in accordance with the 1968, 1975, 1998, and 2007 Earthquake Regulations, as well as the 1975, 1984, and 2000 reinforced concrete standards (TS500). Subsequently, numerical models of these frames were created. The designed buildings were defined at 11 different locations in Hatay province. The different locations selected in Hatay province were chosen in the same positions as the TADAS stations affiliated with AFAD to avoid the process of transferring recorded ground motions between locations. A total of  $2 \times 11$  records (East-West and North-South Horizontal Components) obtained from accelerometers were individually applied, while the recorded vertical accelerations were considered in the numerical analyses. Nonlinear time history analyses were performed considering the 11 different positions and directions for each building type. Within the scope of this study, seismic performances were obtained for a total of 88 different building designs and earthquake scenarios. The results indicate that medium-rise reinforced concrete frame buildings designed in accordance with the design and earthquake regulations used in the past years in our country are inadequate in terms of seismic resistance during earthquakes centered in Kahramanmaraş and the collapse cannot be prevented.

**Keywords:** Earthquake, Reinforced concrete, Structural design, Seismic performance

## 1. GİRİŞ

06 Şubat 2023 tarihinde saat 04:17'de Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık olan büyük bir deprem meydana gelmiştir. Depremin moment büyüklük ( $M_w$ ) cinsinden büyüklüğü Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından 7.7 olarak açıklanmıştır (Enlem: 37.288 N, Boylam: 37.043 E). İlk verilere göre depremin derinliği yaklaşık 8.6 km olarak belirlenmiştir [1]. Depremin en yakın yerleşim birimi olan Kahramanmaraş ilinin Pazarcık ilçesine bağlı Akdemir köyüne uzaklığı 2.72 km'dir [1]. İlk depremden yaklaşık olarak altı saat sonra saat 13:24'de Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde merkez üssü Kahramanmaraş Elbistan olan bağımsız büyük bir deprem daha meydana gelmiştir. Depremin moment büyüklük ( $M_w$ ) cinsinden büyüklüğü AFAD tarafından 7.6 olarak açıklanmıştır (Enlem: 38.089 N, Boylam: 37.239 E). İlk verilere göre depremin derinliği yaklaşık 7.6 km olarak belirlenmiştir. Depremin en yakın yerleşim birimi olan Kahramanmaraş ilinin Elbistan ilçesine bağlı Gümüşdöven köyüne uzaklığı 1.70 km'dir [1].

AFAD Deprem dairesi verilerine göre [2] 6 Şubat – 19 Mart 2023 tarihleri arasında deprem büyüklüğü olarak 6'dan büyük 3 adet, 5'ten büyük 44 adet ve 4'ten büyük 510 adet olmak üzere binlerce artçı

sarsıntı kaydedilmiştir. 20 Mart 2023 tarihi itibarıyla yaklaşık 255.000 binanın hasar aldığı veya yıkılmış olduğu ifade edilmiş, 50 binin üzerinde vatandaşımızın vefat ettiği ve 107.000'den fazla yaralı vatandaşımızın olduğu belirtilmiştir.

6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremler; Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa gibi birçok ili etkileyerek altyapı ve binalarda önemli hasara yol açmış ve çok sayıda can kaybına neden olmuştur. Depremlerde kaydedilen en büyük yer ivmeleri Hatay, Kahramanmaraş ve Gaziantep illerindedir [1].

Ülkemizde deprem yönetmelikleri sırasıyla 1940, 1944, 1949, 1953, 1962, 1968, 1975, 1998, 2007 ve 2018 yıllarında; Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS 500) ise 1969, 1970, 1971, 1972, 1973, 1975, 1984 ve 2000'de yayınlanmıştır [3]. 1984'ten önceki betonarme standartlarında elastik teori kullanılmış olup, 1984'te yayınlanan standartla beraber dönemin bilimsel gelişmelerine paralel olarak [4] taşıma gücü teorisine geçilmiştir. Yapı güvenliği için deterministik yöntem terk edilerek, yarı-olasılıksal çağdaş yapı güvenliği benimsenmiştir [5,6]. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ( $M_w=7.7$ ) ve Kahramanmaraş Elbistan ( $M_w=7.6$ ) depremlerinden etkilenen bölgelerdeki yapı stokunun büyük bir



kısmını oluşturan binaların bu yönetmelikler uyarınca tasarlandıkları açıktır. Bu bakımdan yakın zamanda yaşadığımız bu yıkıcı depremlerin etkilerinin ve sonuçlarının geçmişe yönelik bir bakış açısıyla teorik düzlemde de incelenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışma 1968, 1975, 1998 ve 2007 deprem yönetmelikleri (kısaca TDY) ile 1975, 1984 ve 2000 betonarme standartlarına (kısaca TS500) uygun olarak tasarlanmış ve deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşıdığı binaların sismik yeterliliklerini Hatay bölgesindeki 11 ivme ölçerlerden alınan kayıtların özelinde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Literatürde, Öztürk, tarafından yapılan bir başka çalışmada, üç farklı tasarıma sahip (i. 1953 Betonarme-1961 Deprem Yönetmeliği, ii. 1967 Betonarme-1968 Deprem Yönetmeliği ve iii. 1975 Betonarme-1975 Deprem Yönetmeliği) iki boyutlu çerçeve taşıyıcı sistemin, TDY2007 şartnamesine göre sismik performansı irdelenmiştir. Çalışmada, TDY2007 şartnamesine göre 2. derece deprem bölgesinde olduğu varsayılan bu üç farklı tasarıma sahip çerçeve sisteme sahip binaların TDY2007 şartnamesindeki kriterlere göre yapılan performans değerlendirmesi sonucunda, öngörülen can güvenliği performans düzeyinde olmadığı öne sürülmüştür [7].

Bu çalışmada ise 4 katlı bir betonarme bina çerçevesinin TDY1968+TS500-1975 [8,9], TDY1975+TS500-1975 [9,10], TDY1975+TS500-1984 [10,11], ve TDY1998&2007+TS500-1984&2000 [11-14] yönetmelik ve standartlarına uygun boyutlandırma ve tasarımı yapılmıştır. TDY1998 ile TDY2007'nin deprem hesabı ve betonarme tasarım kısımlarındaki koşullar aynıdır. TS500-1984 ve TS500-2000'de ise küçük farklar olup, tasarım yapılırken iki standardın koşullarına da uyulmuştur. Bilindiği üzere, TDY2007'ye, TDY1998'de olmayan "Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi" bölümü eklenmiştir.

Literatürde, deprem etkileri altında hasar almış ve güncel şartnamelerle tasarlanmış binaların detayları hakkında analizler oldukça ilgi çekmektedir. Bu konuda son yıllarda Kazaz ve arkadaşları tarafından

Kahramanmaraş depremi etkisi altında yıkılmış bir binanın neden yıkıldığına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir [15]. Ayrıca, Cortez ve arkadaşları da sismik etkilerden kaynaklı hasar dağılımlarını numerik olarak incelemiştir. Çalışma deprem ve diğer afetlerin etkileşimini irdelemektedir [16]. Ozturk ve arkadaşları, Maras depremi etkisi altında okul binalarında gözlemlenen hasarları ve hasarların kaynaklarını incelemiştir [17]. Bu çalışmada perde duvar kullanılmayan okul binalarının oldukça fazla hasar aldığı öne sürülmüştür.

Belirtilen şartname ve standartlara uygun olarak bu çalışma kapsamında dizayn edilmiş olan çerçeveler, en yoğun yıkımın gerçekleştiği Hatay bölgesindeki ivmeölçerlerden alınan ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemine göre SAP2000 v.21 programı ile analiz edilmiştir [18]. Boyutlandırması ve donatılandırılması yapılan ve tamamen projesine göre inşa edildiği varsayılan binaların deprem etkisi altında değerlendirilmesi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY2018) kurallar çerçevesinde yapılmıştır [19].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Bina Özellikleri

Bu çalışma kapsamında boyutlandırılması ve donatılandırılması yapılan bina Öztürk (2009) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde dikkate alınan binanın geometrisine benzer olup, kat sayısı ve döşeme yükleri değiştirilmiştir [7]. Ek olarak, yapının 1. Derece Deprem Bölgesi'nde inşa edildiği varsayılmıştır.

Bu tipik çerçeve dört farklı tasarım ve deprem yönetmeliği kombinasyonu düşünülerek ayrı ayrı tasarlanmıştır. İlgili dönemlere ait yönetmeliklere bağlı olarak, TDY1968+TS500-1975, TDY1975+TS500-1975 ve TDY1975+TS500-1984 kombinasyonlarında tasarlanan çerçevelerde C14 (B160) beton ile StI (S220) donatı çeliği kullanılması; TDY1998&2007+TS500-1984&2000'e göre tasarlanan çerçevede ise C20 ve StIII (S420) donatı çeliği kullanılması durumuna göre tasarım gerçekleştirilmiştir. Betonarme



**Çizelge 1.** Katlara etkiyen deprem kuvvetleri

Yönetmelikler	1.Kat (kN)	2.Kat (kN)	3.Kat (kN)	4.Kat (kN)	Toplam (kN)
TDY1968+ TS500-1975	23.6	46.7	69.0	63.4	202.7
TDY1975+TS500-1975	30.1	59.5	87.8	82.4	259.8
TDY1975+TS500-1984	30.1	59.5	87.8	82.4	259.8
TDY1998&2007+TS500-1984&2000	47.2	93.4	138.8	130.3	409.7

**Çizelge 2.** TDY1968+TS500-1975 / Kolon tasarım özeti

Kolonlar	Kolon boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (mm)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
S102-S103-S104-S202-S203-S204	45x45	8φ18	φ6/100
S101-S105-S201-S205	30x30	4φ25	φ6/100
S302-S303-S304	35x35	4φ20	φ6/100
S301-S305	30x30	4φ25	φ6/100
S402-S403-S404	30x30	4φ18	φ6/100
S401-S405	25x25	4φ18	φ6/100

**Çizelge 3.** TDY1968+TS500-1975 / Kiriş tasarım özeti

Kirişler	Kiriş boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (mm)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
1.Kat	30x60	Üst: 4φ22+1φ16 – Alt: 3φ22	φ6/140
2.Kat	30x60	Üst: 4φ22+1φ14 – Alt: 3φ22	φ6/140
3.Kat	30x60	Üst: 4φ22+1φ8 – Alt: 3φ22	φ6/140
4.Kat	20x60	Üst: 2φ22 – Alt: 2φ20	φ6/140

**Çizelge 4.** TDY1975+TS500-1975 / Kolon tasarım özeti

Kolonlar	Kolon boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (mm)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
S102-S103-S104-S202-S203-S204	45x45	12φ22	Φ8/100
S101-S105-S201-S205	30x30	8φ24	Φ8/100
S302-S303-S304	35x35	8φ22	Φ8/100
S301-S305	30x30	8φ24	Φ8/100
S402-S403-S404	30x30	4φ22	Φ8/100
S401-S405	25x25	4φ22	Φ8/100

**Çizelge 5.** TDY1975+TS500-1975 / Kiriş tasarım özeti

Kirişler	Kiriş boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (üst ve alt)	Enine donatı çapı ve aralığı (cm)
1.Kat	30x60	Üst: 6φ22 – Alt: 3φ22	Φ8/140
2.Kat	30x60	Üst: 5φ22+1φ14 – Alt: 3φ22	Φ8/140
3.Kat	30x60	Üst: 4φ22+1φ18 – Alt: 3φ22	Φ8/140
4.Kat	20x60	Üst: 3φ20 – Alt: 2φ20	Φ8/140

**Çizelge 6.** TDY1975+TS500-1984 / Kolon tasarım özeti

Kolonlar	Kolon boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (mm)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
S102-S103-S104-S202-S203-S204	45x45	8φ20	Φ8/100
S101-S105-S201-S205	30x30	8φ18	Φ8/100
S302-S303-S304	35x35	8φ18	Φ8/100
S301-S305	30x30	8φ18	Φ8/100
S402-S403-S404	30x30	4φ22	Φ8/100
S401-S405	25x25	4φ20	Φ8/100

**Çizelge 7.** TDY1975+TS500-1984/ Kiriş tasarım özeti

Kirişler	Kiriş boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (üst ve alt)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
1.Kat	30x60	Üst: 6φ22 – Alt: 3φ22	Φ8/140
2.Kat	30x60	Üst: 5φ22+1φ14 – Alt: 3φ22	Φ8/140
3.Kat	30x60	Üst: 4φ22+1φ18 – Alt: 3φ22	Φ8/140
4.Kat	20x60	Üst: 3φ20 – Alt: 2φ22	Φ8/140

**Çizelge 8.** TDY1998&2007+TS500-1984&2000 / Kolon tasarım özeti

Kolonlar	Kolon boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (mm)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
S102-S103-S104-S202-S203-S204	45x45	8φ25	Φ8/100 + Φ8 Çiroz
S101-S105-S201-S205	35x35	8φ22	Φ8/100 + Φ8 Çiroz
S302-S303-S304	35x35	8φ25	Φ8/100 + Φ8 Çiroz
S301-S305	35x35	8φ22	Φ8/100 + Φ8 Çiroz
S402-S403-S404	35x35	8φ24	Φ8/100 + Φ8 Çiroz
S401-S405	35x35	8φ20	Φ8/100 + Φ8 Çiroz

**Çizelge 9.** TDY1998&2007+TS500-1984&2000 / Kiriş tasarım özeti

Kirişler	Kiriş boyutları (cm)	Boyuna donatı adedi ve çapı (üst ve alt)	Enine donatı çapı ve aralığı (mm)
1.Kat	30x60	Üst: 4φ20+ 1φ8 – Alt: 3φ18	Φ8/140
2.Kat	30x60	Üst: 4φ20 – Alt: 3φ18	Φ8/140
3.Kat	30x60	Üst: 3φ20+1φ10 – Alt: 3φ16	Φ8/140
4.Kat	20x60	Üst: 2φ20 – Alt: 2φ16	Φ8/140

## 2.2. Model Detayları

Çerçeveler 2 boyutlu olarak SAP2000 v.21 programı ile modellenmiştir. Modellemede kolonlar ve kirişler ilgili kesit boyutları ile çubuk eleman olarak dikkate alınmıştır. Bütün kolonlar zemine rijit bir şekilde bağlanmıştır. Modellerde bölme duvarlar dikkate alınmamıştır.

Kirişler tablasız dikdörtgen kesit, kolonlar kare kesitli ve simetrik donatılı olarak tasarlanmıştır. 12 cm kalınlığa sahip döşeme için döşeme yükleri normal katlarda ölü yükler  $g=4\text{kN/m}^2$ , hareketli yükler  $q=2\text{kN/m}^2$  olarak; çatı katında ise ölü yükler  $g=3.6\text{kN/m}^2$ , hareketli yükler  $q=0.75\text{kN/m}^2$  olarak alınmıştır. Binada düzlem içindeki iç akslardaki tüm açıklıklarda duvar olduğu düşünülmüş, düzleme dik akslardaki çerçevelerde ise sadece en dış akslarda duvar olduğu varsayılmıştır. Duvar yükleri  $2.5\text{kN/m}^2$  olarak dikkate alınmıştır. Katlara etkiyen deprem yükleri ise yönetmeliklerin ilgili maddelerine uygun olarak hesaplanmış ve Çizelge 1'de sunulmuştur.

## 2.3. Yer Hareketleri

Çerçevelerin deprem performansları zaman tanım alanında analizler vasıtasıyla belirleneceğinden yer hareketlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Depremlerinde, Şekil 2'de gösterildiği üzere, Hatay bölgesinde 11 istasyonda doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusunda kaydedilen yatay ivme kayıtları ile düşey doğrultuda kaydedilen ivme kayıtları kullanılmıştır [26]. Bütün ivme kayıtlarının tasarım ivme spektrumları doğu-batı yönü için Şekil 3'te, kuzey-güney yönü için Şekil 4'te ve düşey doğrultu için Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 3'ten görüleceği üzere doğu-batı yönünde incelenen binanın salınım periyodunun bulunduğu aralıkta (0.2-0.4s) gerçekleşen en büyük spektral ivme 3129 nolu istasyonda 4.69g, en düşük spektral ivme ise 3124 nolu istasyonda 1.09g ile hesaplanmıştır. Kuzey-güney doğrultusu dikkate alındığında ise en büyük spektral ivme yine 3129 nolu istasyonda 5.35g olarak, en düşük spektral ivme ise 3136 nolu



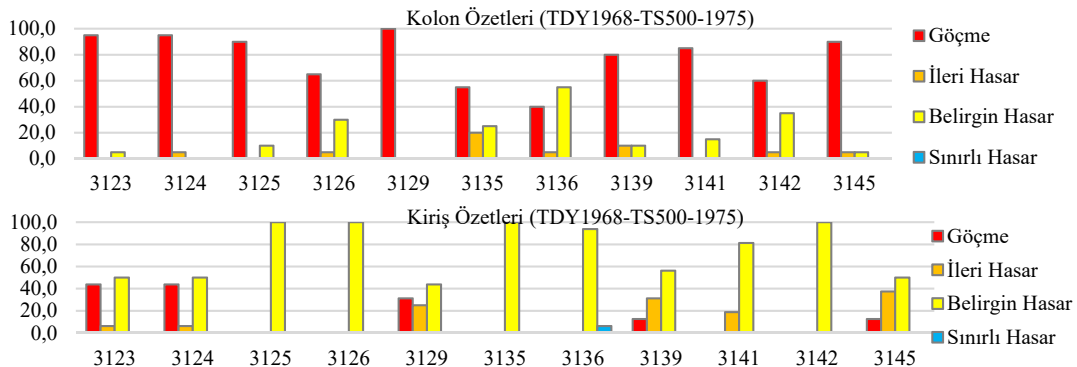
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Analiz sonuçları Çizelge 10-13'te özetlenmiş, Şekil 6-9'da ise grafiksel olarak gösterilmiştir. Çizelge 9 ve Şekil 6'da TDY1968 ve TS500-1975'e göre tasarlanmış çerçevenin deprem performans özeti her bir istasyon verisi için ayrı ayrı verilmiştir. Sonuçlar 11 istasyonda kaydedilen ivmeler dikkate alındığında kolonların çoğunluğunun Göçme bölgesinde yer aldığını göstermektedir. Kiriş performansları dikkate alındığında ise sadece 3123 nolu istasyon verisine göre kirişlerin %43.8'i Göçme bölgesinde, geri kalanı ise Belirgin Hasar ve İleri Hasar bölgesinde bulunmaktadır. 6 Şubat 2023 depremlerinde Hatay'da 11 istasyonda kaydedilen ivme kayıtları kullanılarak yapılan analizlerin tamamı için global performans değerlendirmesi yapıldığında bütün ivme kayıtları altında ele alınan çerçevenin Göçme Performans Seviyesinde olduğu ve hedeflenen Kontrollü Hasar Performans Seviyesini karşılayamadığı belirlenmiştir.

Çizelge 10 ve Şekil 7'de TDY1975 ve TS500-1975 kullanılarak tasarlanan çerçevenin deprem performans özeti 11 istasyon verisi için ayrı ayrı sunulmuştur. Bir önceki tasarımdan farklı olarak bu tasarımda deprem yüklerinin bir miktar artması ile kolon ve kiriş donatılarında artışlar gözlenmiştir. TDY1975 ve TS500-1975 kombinasyonunda kapasitelerde bir miktar artışlar yaşandığından öncelikle kirişler hasar almakta ve nihayetinde kolon hasarları ile sistem stabilitesini yitirmektedir. Bu sebepten ötürü Şekil 7'den görüleceği üzere kirişlerin büyük bir bölümü Göçme bölgesinde bulunmaktadır. Kolon performanslarının da TDY1968+TS500-1975 kombinasyonuna göre bir miktar iyileştiği fakat yine de kolonların genel olarak Göçme performans seviyesinde yer aldığı söylenebilir. Sonuç olarak TDY1975 ve TS500-1975 kombinasyonunda her ne kadar tasarım bir miktar iyileşmişse de bu tasarım sonucunda yapısal elemanların 6 Şubat 2023 depremlerini Kontrollü Hasar Performans Seviyesi ile karşılayamayacağı, aksine Göçme Performansı göstereceği belirlenmiştir.

Çizelge 10. TDY1968+TS500-1975 sonuçları

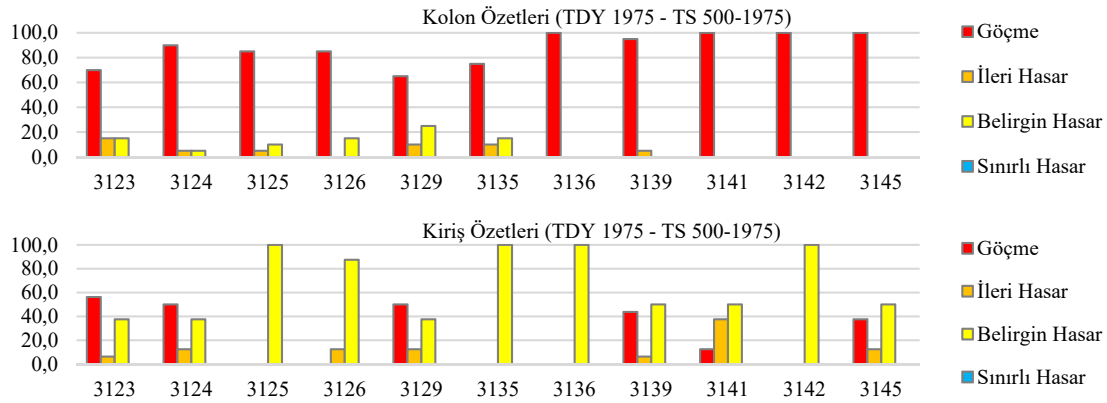
Deprem kaydı	3123	3124	3125	3126	3129	3135	3136	3139	3141	3142	3145	
KOLON%	Göçme	95.0	95.0	90.0	65.0	100.0	55.0	40.0	80.0	85.0	60.0	90.0
	İleri hasar	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	20.0	5.0	10.0	0.0	5.0	5.0
	Belirgin hasar	5.0	0.0	10.0	30.0	0.0	25.0	55.0	10.0	15.0	35.0	5.0
	Sınırlı hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KİRİŞ %	Göçme	43.8	43.8	0.0	0.0	31.3	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0	12.5
	İleri hasar	6.3	6.3	0.0	0.0	25.0	0.0	0.0	31.3	18.8	0.0	37.5
	Belirgin hasar	50.0	50.0	100.0	100.0	43.8	100.0	93.8	56.3	81.3	100.0	50.0
	Sınırlı hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0



Şekil 6. Kolon ve kirişlerin deprem performans özetleri (TDY1968+TS500-1975)

**Çizelge 11.** TDY1975+TS500-1975 sonuçları

	Deprem Kaydı	3123	3124	3125	3126	3129	3135	3136	3139	3141	3142	3145
KOLON %	Göçme	70.0	90.0	85.0	85.0	65.0	75.0	100.0	95.0	100.0	100.0	100.0
	İleri Hasar	15.0	5.0	5.0	0.0	10.0	10.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0
	Belirgin Hasar	15.0	5.0	10.0	15.0	25.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KİRİŞ %	Göçme	56.3	50.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	43.8	12.5	0.0	37.5
	İleri Hasar	6.3	12.5	0.0	12.5	12.5	0.0	0.0	6.3	37.5	0.0	12.5
	Belirgin Hasar	37.5	37.5	100.0	87.5	37.5	100.0	100.0	50.0	50.0	100.0	50.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

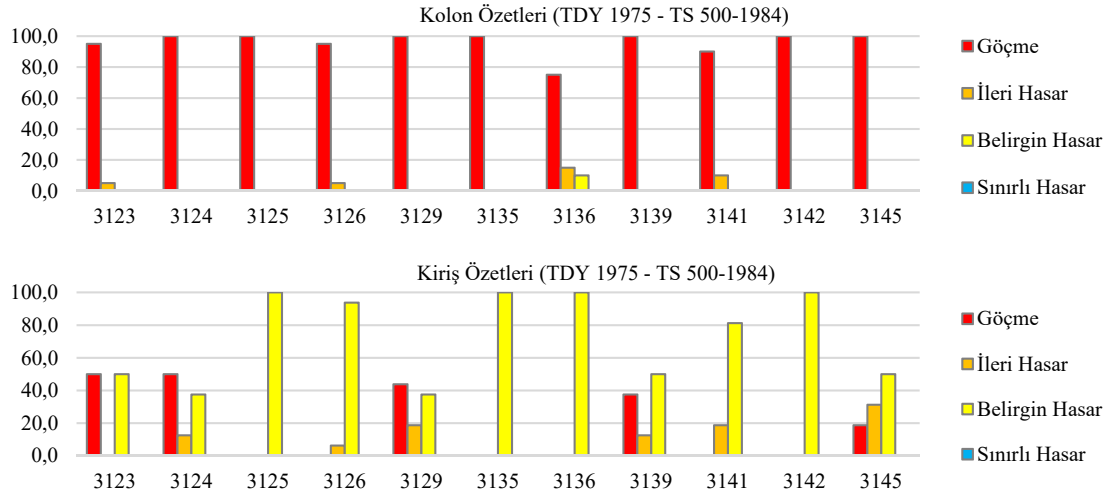
**Şekil 7.** Kolon ve kirişlerin deprem performans özetleri (TDY1975+TS500-1975)

TS500 1984 yılında önemli bir revizyona uğramış ve betonarme tasarımda taşıma gücü yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. TS500-1984'ün sadece tasarım kurallarını içermesi, deprem yüklerinin TDY1975 dikkate alınarak hesaplanması sebebi ile TDY1975 ve TS500-1984 kombinasyonunda kolon boyuna donatılarında bir miktar azalma gerçekleşmiş ve kolon kapasitelerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durum kolon performanslarının diğer kombinasyonlara nazaran daha kötü olması ile

sonuçlanmıştır. Bu tasarım kombinasyonunda 11 istasyonun hepsi için kolonların çoğunluğunun Göçme bölgesinde olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar kiriş kapasitelerinde bir miktar artış olsa da kolonların kötü performansları sebebi ile kirişlerin de performansları olumsuz etkilenmiştir. TDY1975 ve TS500-1984 kombinasyonu ile yapılan tasarımda da zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde ele alınan çerçevenin Göçme Performans Seviyesinde olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 12.** TDY1975+TS500-1984 sonuçları

	Deprem Kaydı	3123	3124	3125	3126	3129	3135	3136	3139	3141	3142	3145
KOLON %	Göçme	95.0	100.0	100.0	95.0	100.0	100.0	75.0	100.0	90.0	100.0	100.0
	İleri Hasar	5.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	15.0	0.0	10.0	0.0	0.0
	Belirgin Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KİRİŞ %	Göçme	50.0	50.0	0.0	0.0	43.8	0.0	0.0	37.5	0.0	0.0	18.8
	İleri Hasar	0.0	12.5	0.0	6.3	18.8	0.0	0.0	12.5	18.8	0.0	31.3
	Belirgin Hasar	50.0	37.5	100.0	93.8	37.5	100.0	100.0	50.0	81.3	100.0	50.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Şekil 8. Kolon ve kirişlerin deprem performans özetleri (TDY1975+TS500-1984)

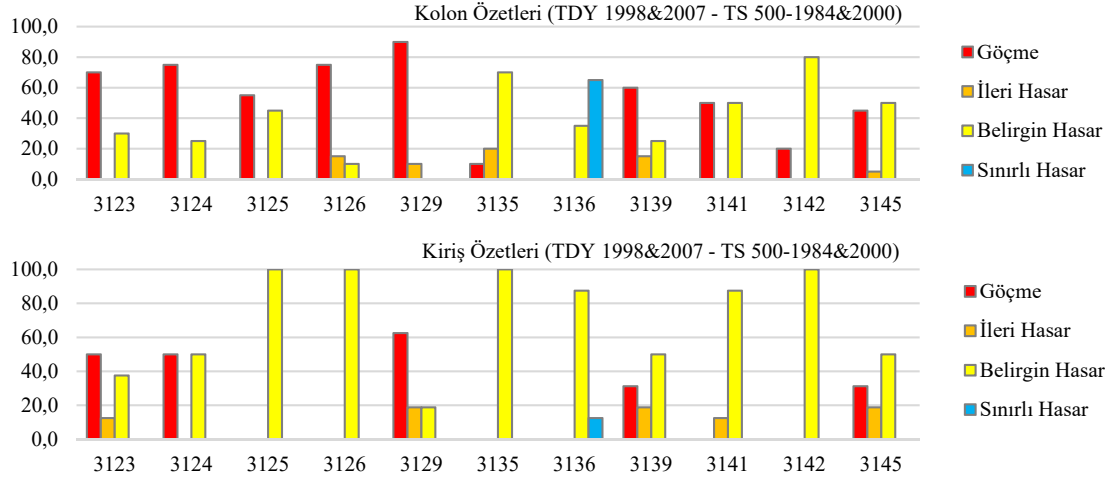
TS500'ün 1984 versiyonu ile 2000 versiyonu arasında taşıma gücü yöntemi bakımından önemli farklılıkların bulunmaması, TDY1998 ile TDY2007'nin de betonarme tasarımı ve deprem yüklerinin hesabı açısından aynı olması sebebi ile TDY1998&2007+TS500-1984&2000 tasarım kombinasyonları bir kombinasyon olarak ele alınarak çerçeve tasarlanmıştır. Çerçeveye etkileyen deprem yüklerinin çok fazla artması sebebi ile yapısal eleman boyutlarında artışlar meydana gelmiş ve nihayetinde donatılar artarak kapasiteleri büyümüştür. Tasarımın iyileşmesi sebebi ile kolon performanslarının iyileştiği, diğer tasarım

kombinasyonlarından farklı olarak bu tasarım kombinasyonunda hiçbir istasyon verisinde kolonların tamamının Göçme bölgesinde olmadığı, 3123, 3124, 3126 ve 3129 istasyonlarından alınan ivme kayıtları altında yapılan analizlerde kolonların %50'nin üzerinde Göçme bölgesinde yer aldığı belirlenmiştir. Global değerlendirme yapıldığında ise yine bütün istasyonlar için kolonların Göçme Performans Seviyesinde bulunduğu gözlenmiştir. Her istasyon verisi altında Göçme bölgesinde yer alan kirişlerin bulunduğu Çizelge 11 ve Şekil 9'da görülebilir.

Çizelge 13. TDY1998&2007+TS500-1984&2000 sonuçları

Deprem Kaydı	3123	3124	3125	3126	3129	3135	3136	3139	3141	3142	3145	
KOLON %	Göçme	70.0	75.0	55.0	75.0	90.0	10.0	0.0	60.0	50.0	20.0	45.0
	İleri Hasar	0.0	0.0	0.0	15.0	10.0	20.0	0.0	15.0	0.0	0.0	5.0
	Belirgin Hasar	30.0	25.0	45.0	10.0	0.0	70.0	35.0	25.0	50.0	80.0	50.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KİRİŞ %	Göçme	50.0	50.0	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	31.3	0.0	0.0	31.3
	İleri Hasar	12.5	0.0	0.0	0.0	18.8	0.0	0.0	18.8	12.5	0.0	18.8
	Belirgin Hasar	37.5	50.0	100.0	100.0	18.8	100.0	87.5	50.0	87.5	100.0	50.0
	Sınırlı Hasar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0

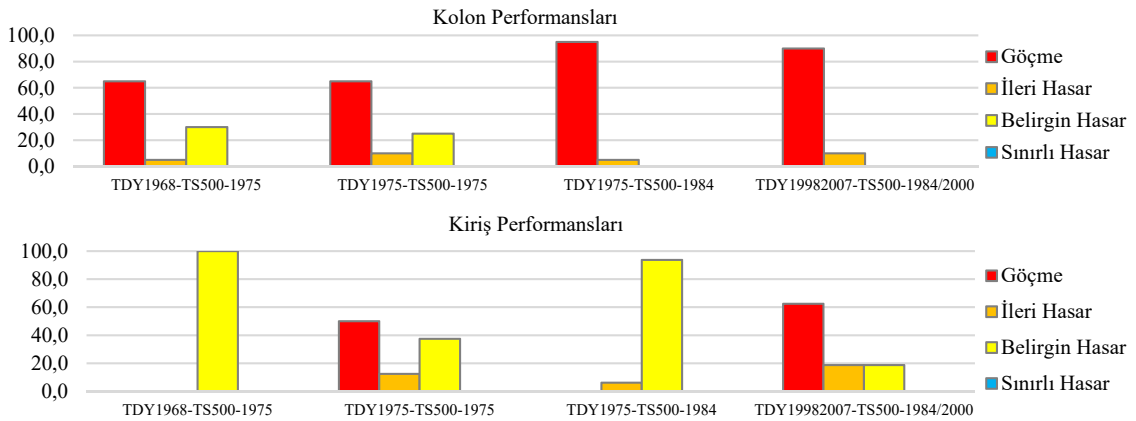




Şekil 9. Kolon ve kirişlerin deprem performans özetleri (TDY1998&amp;2007+TS500-1984&amp;2000)

Yukarıda açıklanan tasarım kombinasyonlarında tespit edilen olumsuz performanslar Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlara göre, 1998 yılına kadar minimum koşullara göre tasarlanan kolonların tamamının 6 Şubat 2023 depremlerinde Göçme Performans Seviyesinde yer alacağı, TDY1998'den sonra tasarımın ve performansın nispeten iyileştiği fakat yine 6 Şubat 2023 depremlerinde yeterli performansın gösterilemediği ortaya konulmaktadır. Dolayısıyla 2007 Yönetmeliği de dahil olmak üzere, 2007 yılına kadar Deprem Yönetmeliği ile Betonarme Tasarım Standardı kullanılarak tamamen minimum

koşullarda çalışan bir bina inşa edilmesi durumunda binaların 6 Şubat 2023 depremlerinde kendisinden beklenen davranışı sergileyemeyeceği, binaların genel olarak Göçme Performans Seviyesinde olabileceği belirlenmiştir. Kirişlerin kolonlardan nispeten daha iyi davranış sergilediği, bu durumun deprem yönetmeliklerinin tasarım ilkesine uygun olmadığı çünkü ele alınan çerçevelerde öncelikli olarak kolonların uç bölgelerinde plastik mafsalların oluştuğu ve global deprem performansının bu sebeple yeterli seviyede olamadığı gözlenmiştir



Şekil 10. Tasarım kombinasyonlarının karşılaştırması

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 1968 yılından bu yana yürürlüğe girmiş Deprem Yönetmelikleri ile Betonarme Tasarım Standartları kullanılarak minimum koşullarda tasarlanmış 4 katlı düzlem çerçevenin 6 Şubat 2023 depremlerinde Hatay Bölgesi'nde kaydedilen 11 adet ivme kaydı altındaki deprem performansı ayrıntılı bir biçimde irdelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1968 yılından itibaren Deprem Yönetmelikleri her büyük depremden sonra güncellenmiş ve binalara etkiyen deprem yükü sürekli olarak artırılmıştır. Örneğin ele alınan çerçevede TDY1998 veya TDY2007'de ön görülen deprem yükleri TDY1968'in iki katından fazladır. TDY1975 ile kıyaslandığında ise bu oran 1,58 olmaktadır. Tasarım deprem yüklerinin artması ile kolon ve kiriş kesit boyutları ve nihayetinde kullanılan donatılarda artışlar gözlenmiştir.
- TS500-1984 ile TS500-1975 standartları arasında tasarım farklılıkları olması sebebi ile TDY1975'teki düşük deprem yüklerinden kaynaklı olarak TS500-1984'te kolonlarda daha az donatı ihtiyacı ortaya çıkmıştır.
- En kötü çerçeve performansı TDY1975+TS500-1984 tasarım kombinasyonunda gözlenmiştir. Fakat 1998 yılına kadar yürürlükte olan yönetmelik ve standartların tamamında kolonların yetersiz performansla sahip olduğu, Hatay Bölgesi'nde kaydedilen 11 ivme kaydı altında da ele alınan çerçevelerin Göçme Performans Seviyesi'nde olduğu belirlenmiştir.
- Her ne kadar TDY1998 ile deprem yüklerindeki artışlara ilave olarak kolon ve kiriş kapasiteleri ile sünekliklerinde iyileşmeler gözlenirse de nihai performansın hedef performans olan can güvenliği veya kontrollü hasar performans seviyesine ulaşmadığı belirlenmiştir. Hatay'da kaydedilen 11 adet ivme kaydı altında yapılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan

analizlerde kolonların büyük bir bölümünün göçme bölgesinde yer aldığı veya kesme kuvveti kapasitesinin yetersiz olduğu gözlenmiştir.

- Kuvvetli kolon - zayıf kiriş felsefesine göre tasarlanan binalarda bile göçme performans seviyesinin meydana gelmesinin sebeplerinden biri olarak 6 Şubat 2023 depremlerinde ortaya çıkan ivmelerin deprem yönetmeliklerinin öngördüğü ivmelerden büyük olması ve moment-kesme kuvveti taleplerinin karşılanmasında mevcut yapısal elemanların yetersiz kalması gösterilebilir.

Sonuç olarak deprem yönetmeliklerinin ve ilgili standartlarının minimum koşulları da gözetilerek yapılan tasarımların yeterli deprem performansı sergileyemeyeceği görülmüştür. Kolon boyutları ve donatıları belirli bir kapasiteyi garanti etse de kolonların yeterli deprem performansını sağlayamadığı, bu hususun kolon boyutlarından kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Kolon boyutları çerçeve rijitliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğundan çerçevenin yatay deplasmanlarının artması ile kolonların moment ve kesme taleplerinde artışlar olmaktadır. Bu taleplerin bu çalışmada ele alınan yeterli minimum kesitlerle karşılanamayacağı bir kez daha gözlemlendiğinden, deprem performansının salt donatı ile iyileştirilemeyeceği sonucuna varılmıştır. 1. ve 2. derece deprem bölgelerinde yapılan yapılara mutlaka perde duvar yapıma zorunluluğu yönetmeliklere eklenmelidir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Hacettepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2023. 06 Şubat 2023-Kahramanmaraş Pazarcık (Mw=7,7) ve Kahramanmaraş Elbistan (Mw=7,6) Depremleri İnceleme Raporu, 170.
2. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), 2020. 06 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 ve Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 Depremlerine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, 12.

3. Sinan, C., 2022. Türkiye’de Kullanılan Deprem Yönetmeliklerinin Özellikleri ve Eşdeğer Deprem Yüklü Hesabının Değişimi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD), 14(1), 58-71.
4. Boyd, A.G., 1983. Neden Taşıma Gücü Yöntemini Kullanmalıyız? Türkiye Mühendislik Haberleri, 1983(3), 3-16.
5. Ersoy, U., 2000. TS500-2000. Türkiye Mühendislik Haberleri, 2000(3), 406-407.
6. Ersoy, U., Tankut, T., (1996). Deprem Yönetmeliği-Uygulamaya Yönelik Kuşular ve Bazı Öneriler. Türkiye Mühendislik Haberleri, 1996(1), 33-39.
7. Öztürk, M.T., 2009. Eski Deprem Yönetmeliklerine Göre Boyutlandırılan Betonarme Binaların Güncel Yönetmeliğe Göre Deprem Performansının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 168.
8. ABYYHY, 1968. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, Sayı: 12801.
9. Türk Standartları TS 500., 1975. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Resmi Gazete, Sayı: 19054.
10. ABYYHY, 1975. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, Sayı: 15260.
11. Türk Standartları TS 500., 1984. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. 90.
12. ABYYHY, 1997. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, Sayı: 23098.
13. DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, Sayı: 26454.
14. Türk Standartları TS 500., 1975. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 81.
15. Kazaz, I., Bilge, I.H., Gürbüz, M., 2024. Near-Fault Ground Motion Characteristics and its Effects on a Collapsed Reinforced Concrete Structure in Hatay During the February 6, 2023  $M_w$  7.8 Kahramanmaraş Earthquake. Engineering Structures, 298(1), 23.
16. Cortez, C., Jünemann, R., Fernández, C., Urrutia, A., Crempien, J.G.F., Cienfuegos, R. 2022. Performance of an RC Building under Seismic and Tsunami Actions in Sequence via Nonlinear Dynamic Analysis Including Soil-Structure Interaction. Engineering Structures, 272(1), 18.
17. Ozturk, M., Arslan, M.H., Dogan, G., Ecemis, A.S., Arslan, H.D. 2023. School Buildings Performance in 7.7  $M_w$  and 7.6  $M_w$  Catastrophic Earthquakes in Southeast of Turkey. Journal of Building Engineering, 79(1), 33.
18. Computers and Structures Inc., 2023. SAP 2000 Advanced Version 21.1.0.
19. TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 30364.
20. Ersoy, U., 2003. Betonarme, Dördüncü Basım, Evrim Yayınevi.
21. Ersoy, U., Güney, Ö., 2001. Betonarme. Geliştirilmiş Yeni Baskı, Evrim Yayınevi.
22. Sabis, T., 1972. Betonarme. Beşinci Baskı, Çağlayan Basımevi.
23. Kınacı, Z., 1978. İki Yönlü Eğilmeli Kolonlar. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
24. Kınacı, Z., 1977. Kiriş ve Döşeme Donatı Çizelgeleri. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
25. Kınacı, Z., Onarlı, F., 1977. Kolon ve Perde Donatı Çizelgeleri. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayınları.
26. AFAD Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi. <https://tadas.afad.gov.tr>, Erişim tarihi: 01.03.2023.
27. PEER-NGA strong motion database. <https://ngawest2.berkeley.edu/>, Erişim tarihi: 01.02.2023.







## Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayınlansın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

**Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz** (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

**Başlık** kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

**Makale ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

**Kitap ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, son sayfa no.

**Bildiri ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirim tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

**Elektronik ortamdan alınmış ise:** Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanmış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirim adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

**Tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

**Rapor ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer.

**Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayımlandığı yıl. yazımın başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Kurum/Kuruluşlara ait ise:** Kurum adı, varsa yayımlandığı yıl. yazımın başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

**Elektronik kitap/rapor ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayımlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.