

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

***FEN BİLİMLERİ***  
ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University  
Journal of  
the  
Institute  
of  
Science and Technology*

**Cilt (Vol.): 39**

**Sayı (No):3**



# ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



### *Genel Yayın Yönetmeni*

Prof. Dr. Oktay ÖZKAN, Erciyes Üniversitesi

### *İmtiyaz Sahibi*

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

### *Baş Editör*

Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

### *Editör*

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

### *Düzenleme Editörleri*

Arş. Gör. Hüseyin ÖZKAYA

Esra TURAN

### *Editörler Kurulu*

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi, [kbilisik@erciyes.edu.tr](mailto:kbilisik@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES, Erciyes Üniversitesi, [onses@erciyes.edu.tr](mailto:onses@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, [akkurt@erciyes.edu.tr](mailto:akkurt@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, [msari@gazi.edu.tr](mailto:msari@gazi.edu.tr)

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, [orhanb@omu.edu.tr](mailto:orhanb@omu.edu.tr)

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, [hasan.kucukbay@inonu.edu.tr](mailto:hasan.kucukbay@inonu.edu.tr)

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, [kamil.koc@cbu.edu.tr](mailto:kamil.koc@cbu.edu.tr)

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, [tuncay.candan@aum.edu.kw](mailto:tuncay.candan@aum.edu.kw)

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, [karaboga@erciyes.edu.tr](mailto:karaboga@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, [senel@erciyes.edu.tr](mailto:senel@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, [dogani@erciyes.edu.tr](mailto:dogani@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, [burak.uzal@agu.edu.tr](mailto:burak.uzal@agu.edu.tr)

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, [nigmet.uzal@agu.edu.tr](mailto:nigmet.uzal@agu.edu.tr)

Prof. Dr. Nuray ATEŐ, Erciyes Üniversitesi, [nuraya@erciyes.edu.tr](mailto:nuraya@erciyes.edu.tr)

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, [mgokcek@ohu.edu.tr](mailto:mgokcek@ohu.edu.tr)

Doç. Dr. Ömer AYDIN, Erciyes Üniversitesi, [omeraydin@erciyes.edu.tr](mailto:omeraydin@erciyes.edu.tr)

Doç. Dr. Emrah TIRAŐ, Erciyes Üniversitesi, [emrahtiras@erciyes.edu.tr](mailto:emrahtiras@erciyes.edu.tr)

Dr. Öğr. Üyesi Erhan KARAKAYA, Yozgat Bozok Üniversitesi, [erhan.karakaya@bozok.edu.tr](mailto:erhan.karakaya@bozok.edu.tr)



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ  
Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology



ISSN: 1012-2354

*Yayın Danışma Kurulu*

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. TUNCAY CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJORGJË, University of New York Tirana

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi



# ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



### *Cilt 39, Sayı 3, Hakem Kurulu*

Prof. Dr. Hediye TÜYDEŞ YAMAN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yeni Wahyuni HARTATI, Universitas Padjadjaran

Prof. Dr. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Fatih Emre BORAN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa AY, Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Ömür AYDOĞMUŞ, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Ömür GÖKKUŞ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz ATIŞ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan KARADENİZ, Ege Üniversitesi

Prof. Dr. Hamit ADİN, Batman Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi

Doç. Dr. Ali DURMUŞ, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Başak DOĞRU MERT, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Ender YILDIRIM, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat PEKER, Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Berkan BİÇER, Tarsus Üniversitesi

Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ, İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Nurcan ALKIŞ BAYHAN, Başkent Üniversitesi

Doç. Dr. Raşit ATELGE, Siirt Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi

Doç. Dr. Sevinç KURBANOĞLU, Ankara Üniversitesi

Doç. Dr. Şahin SÖNMEZ, Malatya Turgut Özal Üniversitesi

Doç. Dr. Yakup YÜREKTÜRK, Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Banu AYSOLMAZ, Eindhoven University of Technology

Dr. Öğr. Üyesi Cihan ÇİFTÇİ, Abdullah Gül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KAYA, Nevşehir Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Erdal AYDIN, Koç Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul GÜL, Kayseri Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Fethi ŞERMET, Iğdır Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Güven Gürkan İNAN, Heriot Watt University  
Dr. Öğr. Üyesi Murat AKPULAT, Erciyes Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞYÜREK, Kayseri Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN, İstanbul Gedik Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Ömer KARABIYIK, Süleyman Demirel Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Özden ÖZCAN TOP, Ortadoğu Teknik Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Rıfat KURBAN, Abdullah Gül Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Salih HİMMETOĞLU, Kayseri Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇINAR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Sibel ARSLAN, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Süreyya KOCABEY, Sağlık Bilimleri Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Tülin ERÇELEBİ AYYILDIZ, Başkent Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Nuri ERTAŞ, Erciyes Üniversitesi  
Arş. Gör. Dr. Emre HASPOLAT, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Arş. Gör. Dr. Selçuk YEŞİLTEPE, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi  
Arş. Gör. Abdulkadir GÜLŞEN, Abdullah Gül Üniversitesi  
Arş. Gör. Ezgi BUDAK, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Dr. Gökhan TÜRKER, İstanbul Medeniyet Üniversitesi  
Dr. Manu SASIDHARAN, University of Cambridge  
Öğr. Gör. Bilgehan GÜRÜNLÜ, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi  
Öğr. Gör. Erhan KAVUNCUOĞLU, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi  
Öğr. Gör. Taner DİNDAR, Ankara Üniversitesi

Cilt: 39 Sayı: 3

Aralık 2023

## İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
350-356	Uç Ağırlıklı Piezoelektrik Kirişlerin İvmeölçer Olarak Tasarımı ve Sayısal Analizi	Araştırma Makalesi
357-368	MR Görüntülerinde Evrişimli Sinir Ağlar Kullanılarak Alzheimer Hastalık Tespiti	Araştırma Makalesi
369-378	Digital Solutions to Support Emergency Response and Relief based on the Findings from Ground Zero after the 6th February 2023 Kahramanmaraş Earthquake Series	Araştırma Makalesi
379-393	3 Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Issa ile Pid Kontrolü	Araştırma Makalesi
394-402	Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Aritmilerin Sınıflandırılması	Araştırma Makalesi
403-416	PEM Yakıt Hücresi Ömrünü Uzatmaya Yönelik Temel Seri Pozitif Süper Gerilim Yükseltmeli Luo Çevirici Tasarımı	Araştırma Makalesi
417-429	Niğde İlinin Hayvansal ve Tarımsal Atık Miktarlarının ve Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi	Araştırma Makalesi
430-437	S355JR (ST52) Sac Malzemenin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi	Araştırma Makalesi
438-445	ERUBABYFACED: Yeni Bir Bebek Yüz Tanıma Veri Seti ve Derin Öğrenme ile Tespit ve Tanınması	Araştırma Makalesi
446-462	Categorization of Technical Debt in Software as a Service Applications	Araştırma Makalesi
463-474	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Recovery From Waste Tetra Pak Packages	Araştırma Makalesi
475-484	Electrochemical Profiling of a Promising Fused Pyrimidine-Triazole Drug Candidate	Araştırma Makalesi
485-496	Tarihi Miralay Şerif Bey Konağının Malzeme Özelliklerine Bağlı Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması	Araştırma Makalesi
497-507	Kablosuz Deri Kanser Takip Sistemleri için Kot-kumaş Tabanlı Giyilebilir Çatal Şeklinde Ultra Geniş Bant Anten	Araştırma Makalesi
508-520	A Methodology for Fast and Accurate Analytical Fragility Analysis of Linear Structural Systems during Wind Storms: ALFA	Araştırma Makalesi
521-537	A Proposal For Strengthening of RC Structures By Using High Strength Lightweight Concrete Panels and Polyurethane Binders	Araştırma Makalesi
538-547	Dilsel Özetleme ile Kentsel Hareketlilik Kalıpları: Bisiklet Verilerinden İlgörüler	Araştırma Makalesi
548-570	Medikal Verilerin Sınıflandırılmasında Federe Öğrenme	Araştırma Makalesi

## Uç ağırlıklı Piezoelektrik Kirişlerin İvmeölçer Olarak Tasarımı ve Sayısal Analizi

Levent Beker\*<sup>1</sup> 

\*<sup>1</sup> Koç Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, İSTANBUL

(Alınış / Received: 12.11.2023, Kabul / Accepted: 29.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

**Anahtar Kelimeler**  
Piezoelektrik, MEMS,  
Algılayıcı tasarım

**Öz:** Bu araştırma, MEMS tabanlı ivmeölçerlerin tasarımı ve geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Günümüzde birçok cihaz, hareket ve oryantasyon algılama yetenekleri sayesinde daha işlevsel hale gelmiştir ve bu yetenekler büyük ölçüde ivmeölçerler sayesinde sağlanmaktadır. Çoğu durumda, cihazların hareketleri belirgin eksenler boyunca gerçekleşir ve bu nedenle, bu özel eksenleri algılayabilen sensörlerin geliştirilmesi genellikle yeterlidir. Literatürde, çok eksenli hareketleri algılayabilen sensörlerin geliştirilmesi önemli bir araştırma alanı olarak kabul edilse de, pratikte, belirli eksenlere odaklanan ivmeölçerlerin tasarım ve üretimi daha hızlı ve maliyet etkin olabilmektedir. Bu çalışmada, hem dikey hem de dönme eksenlerindeki ivmeleri algılayabilen yeni bir ivmeölçer yapısı tasarlanmıştır. Kiriş yapıları kullanılarak geliştirilen bu sensör, yaklaşımsal analizle incelenmiş ve geometrik etkiler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, farklı eksenlerde çalışabilen daha ileri ivmeölçer tasarımlarına yol gösterici olabilir.

## Design and numerical analysis of a piezoelectric cantilever type accelerometer

**Keywords**  
Piezoelectric, MEMS, Sensor  
design

**Abstract:** This research focuses on the design and development of MEMS-based accelerometers. Nowadays, many devices have become more functional due to their ability to detect motion and orientation, largely enabled by accelerometers. In most cases, the movements of these devices occur along distinct axes, making the development of sensors that can detect these specific axes often sufficient. Although the development of sensors capable of detecting multi-axial movements is a significant area of research in the literature, in practice, the design and production of accelerometers focused on specific axes can be faster and more cost-effective. In this study, a new accelerometer structure capable of detecting both vertical and rotational axis movements has been designed. Using beam structures, this sensor has been examined through an approximative analysis, emphasizing geometric effects in detail. The findings from this study could guide the development of more advanced accelerometers capable of operating on different axes.

\*İlgili Yazar, email: lbeker@ku.edu.tr

### 1. Giriş

İvme ölçümü, genişleyen mikrosensör teknolojileri alanında çok önemli bir segmenti oluşturmakta ve bir dizi uygulamada artan taleple deneyimlenen bir alan olmaktadır. Entegre bileşenler olarak ivmeölçerler, cep telefonundan, otomotiv, çeşitli günlük ve endüstriyel aktivitelerde vazgeçilmezdir. Çok farklı alanlarda etkin olarak kullanılmasının sebebi, sadece maliyet olarak ekonomik ve performans olarak güvenilir olmakla kalmayan aynı zamanda kompakt bir form faktörüne de sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [1].

Özellikle otomotiv sektöründe, sağlam, yüksek performanslı ve ekonomik ivmeölçerlere olan talep özellikle belirgindir ve bu talep ulaşım, havacılık, endüstriyel otomasyon, tüketici elektroniği ve hatta biyotıp alanına kadar uzanan geniş bir trendi yansıtmaktadır [2]. Bu uygulamaların genişliği, ivmeölçerlerin günümüzdeki çağdaş teknolojideki merkezi rolünü net olarak vurgular.



Yakın zamanda mikro-üretim tarafındaki gelişmeler ile mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) ivmeölçerlerin geliştirilmesi ve minyatürize edilmesinde önemli rol almıştır. İvme ölçümü için esas olarak üç yöntem bulunmaktadır: piezodirençli, kapasitif ve piezoelektrik, her biri farklı nitelikler ve kısıtlamalar içerir [3]. Örneğin, piezodirençli teknik yüksek hassasiyeti ile tanınırken, kapasitif yöntemler düşük güç tüketimi ve entegrasyon kapasiteleri açısından faydalar sunar. Buna karşılık, piezoelektrik tabanlı mekanizmalar basit üretim teknikleri ile üretilebilmeleri, geniş dinamik aralıkları ve tepki hızları ile ön plana çıkmaktadır [4]. Farklı uygulamalara yönelik kapsamlı araştırma ve geliştirme çabalarına rağmen, evrensel olarak uygulanabilir bir optimal çözüm arayışı sürmektedir [3].

Piezoelektrik çözümler bağlamında, toplu piezoelektrik seramik ivmeölçer sensörleri zaten ticari bir gerçekliktir [5]. Geçtiğimiz on yıl, özellikle ZnO, AlN ve PZT ( $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ) gibi malzemelerin sensör uygulamalarındaki potansiyelleri nedeniyle piezoelektrik ince filmlere yönelik yoğun araştırma çabalarına tanık oldu [6]. Bu filmlerin doğal avantajı, sensör ve elektronik bileşenlerin tek bir altlık üzerinde bir arada bulunduğu tek parça sistemlerin oluşturulmasını sağlayan silisyum pul teknolojisi ile uyumluluklarıdır, bu da güvenilirlikte gelişmeler ve maliyet ve boyutta azalmalar vaat eder [6].

Piezoelektrik ince filmlerin silisyum teknolojisi ile entegrasyonu, boyutları küçültme ve maliyeti düşürme yönünde sanayi trendiyle uyumlu bir adımdır, performans etkinliğini korurken sensör boyutlarını küçültme eğilimi ile uyum sağlar [7]. Bu ilerlemeler, hassas biyomedikal cihazlardan sağlam otomotiv sistemlerine kadar çok çeşitli teknolojilerde hafif, minyatür ivmeölçerlerin bir kritik bir ölçüm cihazı haline geleceğini önermektedir [7].

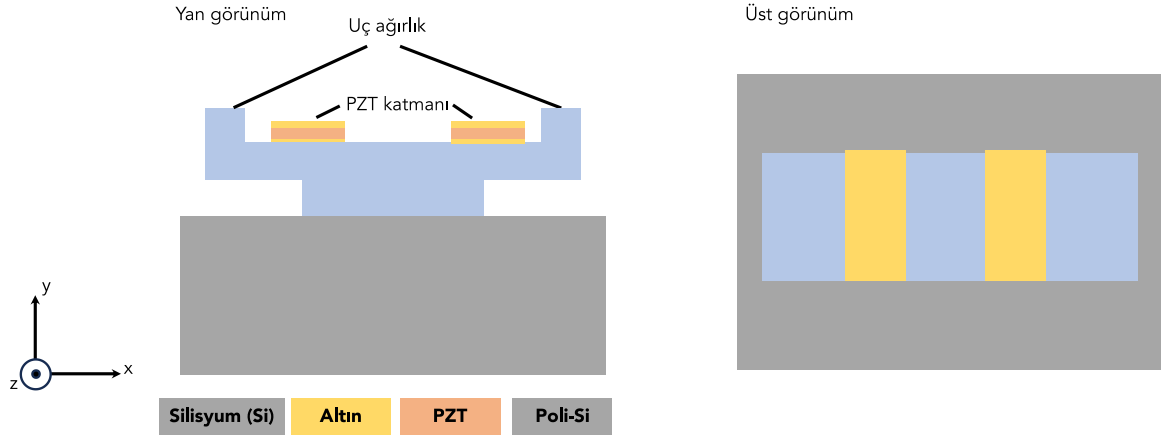
Buna ek olarak elektrostatik ivmelerölçerler, ataletsel sensörler alanında önemli bir kategori oluşturur ve genellikle uzay, otomotiv ve robotik uygulamalarda kullanılır [8]. Bu ivmelerölçerler, ivmeye bağlı olarak bir kanıt kütlesi hareketinin kapasitans değişikliğine neden olduğu elektrostatik kuvvet prensibi üzerine çalışır ve bu değişiklik daha sonra bir elektrik sinyaline dönüştürülür [9]. Bu ivmelerölçerler, yüksek hassasiyetleri, düşük gürültü seviyeleri ve geniş bant genişliği ile bilinirler, bu da onları dinamik ortamlarda hassas ölçümler için uygun kılar. Son dönemde MEMS teknolojisindeki gelişmeler, elektrostatik ivmelerölçerlerin küçültülmesini ve maliyet etkinliğini büyük ölçüde artırmıştır. Fakat kapasitans değişimini okumak için gerekli devrelerin komplike olmasından ötürü dezavantajlıdır [10].

Sonuç olarak, ivmeölçer teknolojisi alanı bir kavşak noktasındadır, etkin, küçük ölçekli ve ekonomik olarak uygulanabilir sensörler için sürekli artan talebi karşılamak üzere çeşitli yollar araştırılmaktadır. Bu makale basit bir mikro üretim metodu ile üretilebilecek piezoelektrik malzeme tabanlı bir ivmeölçerin üretim akışı ve simülasyonunu içermektedir. Varolan kapasitif algılayıcılara göre daha az kritik boyut içermesi ve daha az kritik yapıdan oluşması sebebiyle dinamik aralığı belirli olan uygulamalara yönelik ivmeölçer geliştirilmesinde faydalı olması beklenmektedir.

Piezoelektrik tabanlı ivmeölçerlerin modellenmesi farklı yazarlar tarafından çalışılmış bir konudur [11-14]. Örneğin Lee ve diğerleri piezoelektrik tabanlı bir ivmeölçeri sonlu elemanlar ve meta-modelleme yaklaşımıyla modellemiş ve çalışmalarında optimal sensör tasarımları rezonans frekansının geçerli aralığında (25-47,5 kHz) önerilmektedir bu analizler yardımıyla rezonans frekansını optimize ederek elektrik gerilimini %46,1 artırmıştır [13]. Başka bir çalışmada Altair sonlu elemanlar programı kullanılarak 4 kirise bağlı bir ağırlığın yarattığı etki ile piezoelektrik ivmeölçer tasarım çalışması yapılmıştır [14]. Çalışmada frekansa bağlı deplasman sonuçları verilmiştir ve sönümlenme katsayısının etkisine dikkat çekilmiştir. Fakat bu çalışmalarda tasarımımlar sonlu elemanlar gibi özelleşmiş programlar gerektirmektedir. Bu çalışmada ilk seviye analize uygun olacak şekilde yaklaşımsal bir analiz sunulmuştur.

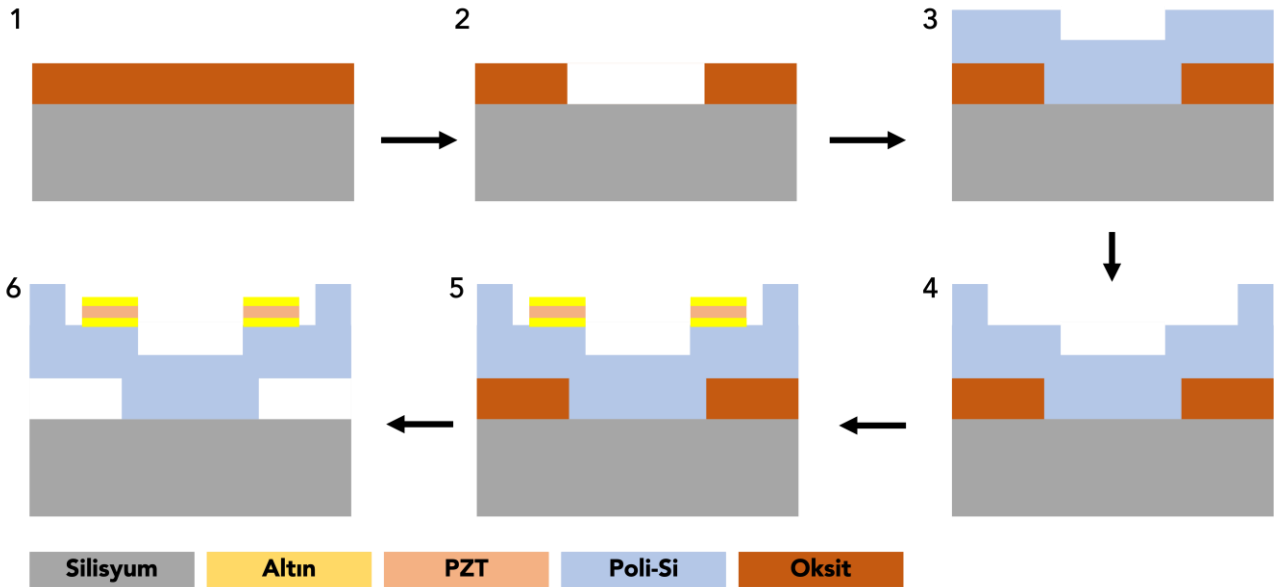
## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada önerilen MEMS piezoelektrik ivmeölçer ince film teknolojisi veya tıraşlanmış seramik teknolojisi kullanılarak geliştirilebilen bir algılayıcıdır (Şekil 1). Bir eksenel sensör (33-modu) olmasının yanısıra, z yönündeki dönел ivmelere de hassas olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kabiliyeti ile bir cep telefonunun dönme ve eksenel yöndeki hareketlerinin algılanmasında kullanılabilir. Eksenel ivme sırasında sismik ağırlık piezoelektrik katman üzerine bir kuvvet uygular, bu kuvvet piezoelektrik etki dolayısıyla katmanda bir yük oluşmasına sebep olur. Bu yük ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki potansiyel fark uygulanan ivmenin ölçülmesinde kullanılır. Aynı şekilde bir dönел ivme oluştuğunda bir taraftaki piezoelektrik katmanda itme kuvveti uygulanırken diğer katmanda çekme kuvveti uygulanır ve bu da ters fazlı potansiyel oluşumuna sebep olur. MEMS sistemine ek olarak kullanılacak sinyal işleme blokları ile bu potansiyel farkı ve büyüklüğü kullanılarak uygulanan dönел ivmenin büyüklüğü belirlenir.



Şekil 1: Önerilen MEMS tabanlı piezoelektrik ivme ölçer mimarisinin şematik olarak yandan ve yukarıdan çizimi.

Önerilen MEMS algılayıcının bir diğer avantajı da kolay bir mikro-üretim akışına sahip olmasıdır. Bu üretim akışı önce bir silisyum puluna altın metali kaplayarak başlamaktadır. Ardından piezoelektrik malzeme farklı metotlarla kaplanabilir. Burada hem ince film hem de kalın film teknikleri kullanılabilir. Ardından piezoelektrik malzeme aşındırılır ve üstünden elektriksel kontak almak amacıyla ikinci bir metal kaplama işlemi yapılır. Bu işlemin ardından sismik ağırlığın oluşturulması için geçici bir katman yapılması gereklidir. Bu aşamada mikro üretim tesisinde bulunan alt yapıya göre farklı malzemeler kullanmak olasıdır. Sıvı Aşındırıcılar ile kolaylıkla kaldırılabilmesi sebebiyle oksit buradaki kullanılacak malzemelerden bir tanesidir. Kaplama yapıldıktan sonra piezoelektrik katmanlardan kontak alınması sebebiyle ilgili kısım var litografi projesi ile aşındırılır. Ardından sismik ağırlığı oluşturan malzemenin kaplanması yapılabilir. Bu malzeme yine mikro üretim tesisinde bulunan altyapı çerçevesinde düşünülerek farklı malzemeler kullanılabilir. Örneğin poli-silisyum malzemesi kullanılarak bir kaplama yapıldıktan sonra geçici oksit katmanı kimyasal prensesler kullanılarak aşındırılır. Bu aşındırma prosesi bir sıvı kimyasal kullanılarak veya buhar fazında bir kimyasal kullanılarak da yapılabilir.



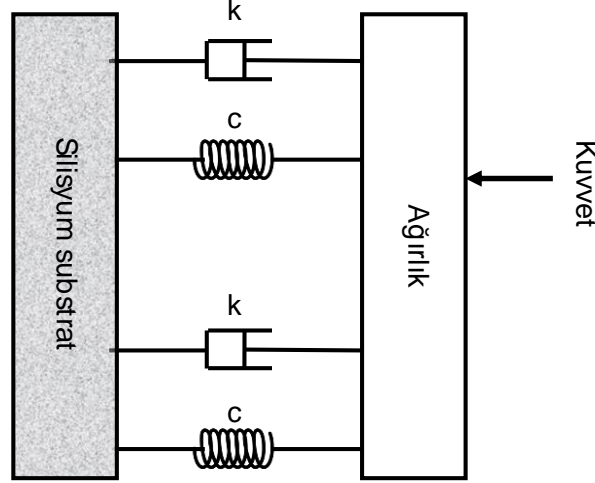
Şekil 2: Sismik ağırlıklı ivmeölçer tasarımının mikro-üretim akışı.

## 2.1. İvmeölçer tasarımı

İvmeölçerin tasarımında piezoelektrik malzeme kullanılması dolayısıyla ilgili malzeme denklemleri de hesaba katılmalıdır. Örneğin aksenal emeği düşünecek olursak en önemli faktör piezoelektrik katmanın katılığıdır. Piezoelektrik katmanın katılığını  $k$  ile gösterecek olursak aşağıdaki (1) numaralı denklemi kullanabiliriz.

$$k = \frac{Ac_{33}}{l} \quad (1)$$

Bu denklemde A toplam alanı, L yük olmayan durumda piezoelektrik katmanın kalınlığını,  $c_{33}$  piezoelektrik katmanın sabit elektrik alanda katılık katsayısını belirtir. İlk yaklaşımda kalınlıkları piezoelektrik katmandan birkaç faktör düşük olmasından dolayı metal katmanı katmandan da ilerlemek mümkündür. Aynı şekilde malzemenin hıza karşı olan direncini temsil sönümlenme katsayısı, c, tasarımda kullanılması gereken bir parametredir. Şekil 3'de parametreler kullanılarak oluşturulmuş sembolik olarak sismik ağırlık üzerine uygulanan kuvvetler ve elemanları gösteren sembolik bir şema hazırlanmıştır.



**Şekil 3: Sismik ağırlıklı iki eksenli ivmeölçer tasarımının şematik olarak gösterimi.**

Bu aşamada silisyum substrata uygulanan deplasmanı  $x_1$  ve sismik ağırlığın kendi deplasmanını  $x_2$  ile gösterecek olursak ve kuvvetler dengesini gözetirsek aşağıdaki (2) numaralı denklemi elde ederiz.

$$m\ddot{x}_2 + c_{eq}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{eq}(x_2 - x_1 - l) = 0 \quad (2)$$

Bu ifadeyi deplasmanlar ve piezoelektrik katmanın kalınlığı arasındaki ilişkiyi düşünerek ve aşağıdaki ifadeleri kullanarak sadeleştirdikten sonra Fourier Transformasyonu uygulayarak sistemin frekans olarak dinamik yapısını anlayabiliriz:

$$\frac{\Delta l(\omega)}{\ddot{x}_1(\omega)} = \frac{1}{\left(\omega^2 - \frac{k_{eq}}{m}\right) - i\omega \frac{c_{eq}}{m}} \quad (3)$$

Bu denklemi kullanarak yapının farklı frekanslara cevabını görebileceğimiz bir analiz yapılabilirdiği gibi aynı zamanda yapının doğal frekansını da bulabiliriz. Bir piezoelektrik malzeme tarafından frekansa bağlı olarak üretilen voltaj denklemini tüm geometrik ve malzeme faktörleriyle bütünleştirmek için farklı parametreleri göz önünde bulundurmamız gerekmektedir: 1) Piezoelektrik katsayılar ( $d_{ij}$ ): Bu katsayılar, piezoelektrik etkinin malzeme eksenlerine göre yönelimine bağlıdır; 2) Dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_{ij}$ ): Bu da piezoelektrik malzemelerde yön bağımlıdır ve üretilen voltajı etkiler; 3) Elastik uyumluluk veya sertlik ( $S_{ijkl}$  veya  $C_{ijkl}$ ): Bu tensör, malzemede gerilimi şekil değiştirmeye bağlar ve mekanik titreşimlerin elektrik enerjisine nasıl dönüştürüldüğünü etkiler. 4) Malzemenin geometrisi: Piezoelektrik elemanın uzunluğu ( $l$ ), genişliği ( $w$ ), ve kalınlığı ( $t$ ) gerilim dağılımını ve elektrik alan üretimini belirler.

Piezoelektrik bir malzemedeki tam üç boyutlu elektromekanik etkileşim tensör notasyonu ile ifade edilebilir. Ancak basitlik adına, genellikle elektrik alanın uygulanan gerilimle aynı yönde üretildiği uzunlamasına bir etki için yaygın olan tek bir piezoelektrik katsayı  $d_{33}$  ile bir boyutlu bir durumu ele alabiliriz.

Bir kırıçta, bükülme momenti  $M$  nedeniyle oluşan gerilim  $\sigma$  şu şekilde verilebilir:

$$\sigma(y) = \frac{My}{I} \quad (4)$$

Burada:

y, nötr ekseninden olan mesafedir,

I, kiriş kesitinin alan momenti inertisidir ( $I=wt^3/12$  dikdörtgen bir kesit için).

Kirişe bağlı veya kirişe gömülü bir piezoelektrik malzeme için, malzemenin gerilimin maksimum olduğu bir mesafede yerleştirildiğini varsayabiliriz, genellikle yüzeyde ( $y=t/2$ ).

Piezoelektrik malzemenin kalınlığı t boyunca indüklenen voltaj V, elektrik yer değiştirmesi D ile şu şekilde ilişkilendirilir:

$$V(t) = \frac{D(t)t}{\epsilon_{33}} \quad (5)$$

Gerilim ve piezoelektrik etkiyi kullanarak D'yi, ve gerilme nedeniyle oluşacak potansiyeli şöyle ifade edebiliriz:

$$V(t) = \frac{d_{33}My}{I\epsilon_{33}}t = \frac{d_{33}M(t)t/2}{wt^3/12\epsilon_{33}}t \quad (6)$$

Bu ifadede M, bükülme momentini ifade etmektedir, ve basit bir durum için  $M = F.L$  ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak, zaman ve frekans cinsinden elde edilen voltaj şöyle ifade edilebilir.

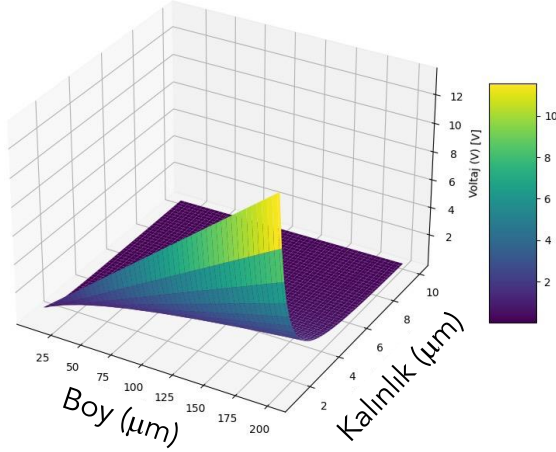
$$V(t) = \frac{6d_{33}M_{max}}{wt^3\epsilon_{33}}(\sin 2\pi ft) = \frac{6d_{33}FL}{wt^3\epsilon_{33}}(\sin 2\pi ft) \quad (7)$$

Belirli bir frekansta bir kuvvet uygulandığında bu ifadeyi kullanarak, farklı geometrik ve malzeme parametrelerinin nasıl potansiyel üreteceği hakkında fikir sahibi olma fırsatı sunacaktır.

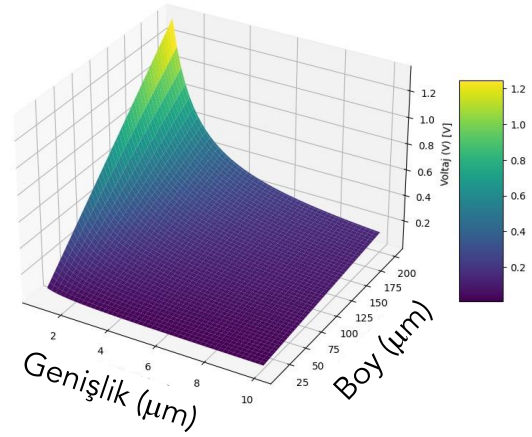
### 3. Bulgular

Boy (L), kalınlık (t) ve voltaj çıktısı (V) arasındaki ilişki, piezoelektrik malzemelerin temel özelliklerini yansıtır. Boy uzadıkça, malzeme üzerine uygulanan kuvvetin etkisi artar, bu da voltaj çıktısını artırır. Kiriş yapısında kullanılan uç ağırlığı bu etkiyi artırır. Öte yandan, kalınlık arttıkça, malzemenin içinden geçen elektrik alan azalır ve bu da voltaj çıktısını düşürür. Bu iki faktörün dengesi, piezoelektrik cihazların tasarımında kritik öneme sahiptir. İdeal voltaj çıktısını elde etmek için, boy ve kalınlığın dikkatlice ayarlanması ve malzemenin piezoelektrik özelliklerine uygun olarak optimize edilmesi gerekir. Bu, piezoelektrik cihazların verimliliğini ve etkinliğini doğrudan etkiler. MEMS tipi sistemlerin üretim koşulları ve limitasyonları hesaba alındığında kirişlerin boy aralığı 25 ve 200  $\mu\text{m}$ , genişliği iki ila 10  $\mu\text{m}$  ve kalınlığı ise iki ila 10  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. Örneğin kalınlığı belirleyecek üretim aşamasında yapısal bir malzeme kullanılacak olduğu var sayıldığında ve bunu yapabilecek üretim prosesleri düşünüldüğünde belirtilen aralık makul bir üretime şans tanımaktadır. Analiz bu limitasyonlara sınırlı olmadığı gibi daha geniş boyda üretim yapılma kapasitesindeki cihazlar için de yol gösterici olabilir.

Boy ve kalınlığın voltaja etkisi



Boy ve genişliğin voltaja etkisi



Şekil 4: Geometrik parametrelerin voltaj çıkışına etkisi.

Yukarıdaki grafiklerde bu ilişkinin nasıl olduğu gösterilmiştir. Kirişin boyu arttıkça, artan momentden dolayı piezoelektrik malzemedeki gerinim artmakta ve dolayısıyla potansiyel çıktısı da artmaktadır. Yapılan numerik yaklaşımların sonucuna bakarak olursak potansiyel çıktısını arttırmak için boyu arttırırken kalınlığı azaltmak gerekmektedir. Sebebi ise kalınlık arttıkça piezoelektrik malzemedeki gerinimin kirişin katılığının artması dolayısıyla azalmaktadır. Benzer bir ilişki boy ile genişlik arasında da görülebilir. Bu ilişkide de yine boy arttıkça ve genişlik azaldıkça potansiyel artmaktadır. Dolayısıyla bu iki çıktıdan da anlaşılacağı üzere piezoelektrik malzeme seçim yapıldıktan sonra kullanılacak geometrik parametreler sisteme uygulanan ivmeyi voltaja çevirmede oldukça kritik olacaktır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada MEMS sensörlerden birisi olan ivmeölçerler üzerine odaklanılmıştır. Hareket ve oryantasyonun bir çok cihazda algılanması bu sensörlerin tasarım ve geliştirilmesi sonucu olmaktadır. Bir çok cihazda hareketler belirli oryantasyonda olmakta ve dolayısıyla bu dominant eksenlerin anlaşılması yeterli olmaktadır. Literatürde bir çok farklı eksenlerde gelecek inmeyi algılayan sensörlerinin geliştirilmesi oldukça popüler bir araştırma konusu olsa da gerçek hayatta kullanılan cihazlara bakıldığında bu dominant eksenlere odaklanan sensörlerin tasarım ve üretiminin çok daha hızlı ve az maliyetli olabileceği görülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada giriş yapıları kullanılarak bir hem dik eksen de dönme eksenindeki ivmeleri algılayabilecek bir ivmeölçer yapısı önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen yapının yaklaşımsal analizi yapılmış ve geometri etkileri ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışma temel alınarak farklı eksenlerde çalışabilecek ivmeölçerler geliştirilmesi olasıdır.

#### Kaynakça

- [1] Bao, M. H., Yang, H. 2007. Squeeze film air damping in MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 3-27.
- [2] Bernstein, J., Cho, S., King, A., Kourepenis, A., Maciel, P., & Weinberg, M. 1999. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. In *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*.
- [3] - Lang, J. H. 2003. Integrated Ferroelectrics: Past, Present, and Future. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50(9), 1064-1074.
- [4] Lee, B., & Choi, D. 2001. A temperature-compensated silicon accelerometer based on a piezoresistive sensing scheme. *Sensors and Actuators A: Physical*, 90(1-2), 38-42.
- [5] Liu, C. 2007. *Foundations of MEMS*. Pearson Prentice Hall.
- [6] Murali, P. 2000. Ferroelectric thin films for micro-sensors and actuators: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(2), 136.
- [7] Petersen, K. E. 1982. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5), 420-457.

- [8] Yu, H., Chen, B., & Xie, L. 2016. A review of MEMS capacitive accelerometers. *Sensors*, 16(8), 1161.
- [9] Yazdi, N., Ayazi, F., & Najafi, K. 2004. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 92(1), 76-97.
- [10] Zhang, G., & Li, H. 2019. Advances in MEMS electrostatic accelerometers. *Micromachines*, 10(8), 522.
- [11] Lee, G.J., Hwang, W.J., Park, J.J. and Lee, M.K., 2019. Study of sensitive parameters on the sensor performance of a compression-type piezoelectric accelerometer based on the meta-model. *Energies*, 12(7), p.1381.
- [12] Lee, M.K., Han, S.H., Park, J.J. and Lee, G.J., 2020. A theoretical and empirical investigation of design characteristics in a Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub>-based piezoelectric accelerometer. *Sensors*, 20(12), p.3545.
- [13] Lee, M.K., Han, S.H., Park, K.H., Park, J.J., Kim, W.W., Hwang, W.J. and Lee, G.J., 2019. Design optimization of bulk piezoelectric acceleration sensor for enhanced performance. *Sensors*, 19(15), p.3360.
- [14] Jency, J.G., Sekar, M. and Sankar, A.R., 2021. Damping analysis of a quad beam MEMS piezoresistive accelerometer. *International Journal of Modelling and Simulation*, 41(4), pp.256-264.

## MR Görüntülerinde Evrişimli Sinir Ağlar Kullanılarak Alzheimer Hastalık Tespiti\*

SümeYYe Ünlüleblebici\*<sup>1</sup> , Murat Taşyürek<sup>2</sup> , Celal Öztürk<sup>3</sup> 

\*<sup>1</sup> Kayseri Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>2</sup> Kayseri Üniversitesi Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>3</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 15.02.2023, Kabul / Accepted: 19.10.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Derin Öğrenme,  
Evrişimli Sinir Ağları,  
Alzheimer hastalığı

**Öz:** Demans beyni etkileyen, hafıza ve düşünmede eksikliklere neden olan bir bulgudur. Demans türleri arasında en sık rastlanılan Alzheimer hastalığı (AH) özellikle yaşlı bireylerde görülen, beyinde hafıza kaybına ve gündelik hayatı aksatmaya neden olan bir rahatsızlıktır. Bu hastalığın tedavisi henüz mümkün olmasa da ilerlemesini engelleyecek tedbirler alınabilmektedir. Erken teşhis ile beyinde kalıcı hasarlar oluşmadan tedaviye başlanarak önemli ölçüde yol kat edilebilir. Manyetik rezonans (MR) görüntüleme AH teşhisinde yaygın olarak kullanılmaktadır, MR görüntülerinin analizi ile beyindeki hacimsel değişimler gözlemlenebilir ve AH sınıflandırılması yapılabilir. Derin öğrenme yöntemleri ile görüntü analizlerinde hızlı ve başarılı sonuçlar alındığı literatür taramasında gözlemlenmiştir. Bu çalışmada MR görüntüleri ile AH sınıflandırmasında derin öğrenme yöntemlerinin başarısı araştırılmıştır. AH sınıflandırması için iki boyutlu evrişimli sinir ağları (2D CNN) algoritması olan YOLO v4 ve üç boyutlu evrişimli sinir ağı modeli (3D CNN) kullanılmıştır. 2D CNN modeli için MR verileri iki boyuta indirgenmiş ve ön işlemlerden geçirilmiş haliyle eğitilip sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Sınıflandırma sonuçlarında 3D CNN modeli 2D CNN modeline göre daha başarılı çıkmıştır. 2D CNN modelinde doğruluk değeri %68 iken bu değer 3D CNN modelinde %88'e yükselmiştir.

## Alzheimer's Disease Detection Using Convolutional Neural Networks on MR Images

### Keywords

Deep Learning,  
Convolutional Neural Network,  
Alzheimer's Disease

**Abstract:** Dementia is a disease that affects the brain and causes deficits in memory and thinking. Alzheimer's disease (AD), which is the most common type of dementia, is a disorder that causes memory loss and disruption of daily life, especially in elderly individuals. Although the treatment of this disease is not yet possible, make provision for can be taken to prevent its progression. Thanks to early diagnosis, treatment can go a long way before permanent damage to the brain occurs. Magnetic resonance (MR) imaging is widely used in the diagnosis of AD, with the analysis of MR images, volumetric changes in the brain can be observed; With these analyzes, it is possible to identify and classify the stages of the disease. It has been observed in the literature review that fast and successful results are obtained in image analysis deep learning methods. In this study, MR images were used and the success of deep learning methods in AD classification was investigated. YOLO v4, a two-dimensional convolutional neural network (2D CNN) algorithm, and a three-dimensional convolutional neural network model (3D CNN) have been used for AD classification. For the 2D CNN model, the MR data was reduced to 2 dimensions and preprocessed, trained and classified. In the classification results, the 3D CNN model

\* Bu çalışma "Derin öğrenme yöntemlerine dayalı beyin görüntülerinin analizi ile Alzheimer hastalık sınıflandırması" başlıklı tamamlanan yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır.

was quite successful compared to the 2D CNN model. While the accuracy value was 68% in the 2D CNN model, this value increased to 88% in the 3D CNN model.

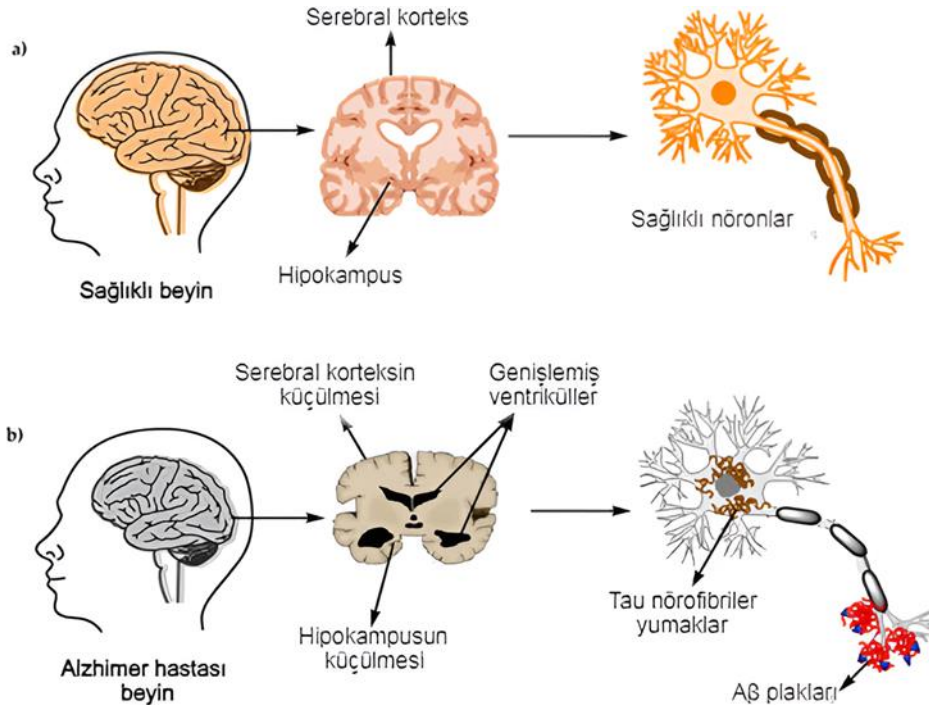
\*İlgili Yazar, email: sumeyyeyaydin@kayseri.edu.tr

## 1. Giriş

Alzheimer hastalığı (AH) bunama diğer adıyla demans çeşitlerinden biridir. AH daha çok yaşlılarda görülen bir hastalıktır. 65 yaşından daha büyük yaşlara sahip insanlarda AH'ye rastlanma oranı %3 ila %11 iken, 85 yaşından ileri yaşlardaki insanlarda bu oran %20 ila %47'ye yükselmektedir. Dünya nüfusunun yaşlanması sebebiyle yıllar içinde Alzheimer hastası kişi sayısının artacağı öngörülmektedir. Uluslararası Alzheimer Federasyonu yayınladığı 2015 Dünya Alzheimer Raporu'na göre dünya çapında yaklaşık 46,8 milyon AH olduğunu bildirmiş ve bu sayının 2030 yılında 74,8 milyon, 2050 yılında da 131.5 milyona ulaşabileceğini tahmin edilmiştir [1].

AH belirtilerinde başlıca ilk görülen semptom bellek bozukluğudur. Hastalık kişide unutkanlığa, düşünmede eksikliğe ve günlük hayatındaki aktivitelerde zorluk yaşamasına sebep olur. İlk zamanlar hafif seyreden semptomlar zamanla ilerler. Hastalık son evrelerinde hastanın başka birine muhtaç yaşamasını gerekli kılar. Yatağa bağımlı hale gelen hasta başka rahatsızlıkların eşlik etmesi ile kaybedilmektedir. AH günümüzde kesin tedavisi bulunamamış bir hastalıktır. Fakat hastalığın ilerleme seyrini yavaşlatabilecek önlemler uygun tedaviler eşliğinde mümkündür. Bu sebeple erken teşhis ile AH'nin ileri ve geri dönüşmez aşamalarına (nöron kayıpları) gelmeden hastalığın saptanıp tedavi sürecine başlanması çok önemlidir.

AH nörodejeneratif bir hastalıktır. Hasta insanların beyinde amiloid beta protein plakları birikimi ve tau proteinlerinin beyinde yayılması gözlenir. Tau proteinleri bozulma sonucu yumak yapılarını oluşturur. AH'nin beyinde oluşturduğu değişikliklerden en belirgin özelliklerinden biri de beyindeki küçülme ve hafıza ile ilgili olan temporal lob ile limbik lob gibi bölgelerdeki hacimsel farklılıklardır. AH'nin beyinde neden olduğu değişiklikler Şekil 1'de verilmiştir [2]. Şekil 1'de görüldüğü üzere AH bireyin beyinde serebral korteks ve hipokampus küçülmekte ve ventrikül adı verilen boşluklar büyümektedir, bu da beyinde hacimsel küçülmeye neden olur. Ayrıca beyin nöronlarındaki Tau proteinlerinden kaynaklanan bozulmalar da Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Beynin fizyolojik yapısı, (a) sağlıklı beyindeki ve (b) Alzheimer hastası beyindeki nöronlar [2]

Demans hastalıklarının teşhis ve değerlendirilmesinde klinik bulgular şüphesiz çok önemlidir. Ancak kesin ayırıcı tanı için biyobelirteç ölçümleri gereklidir. AH tespit edilmesi için beyin görüntüleme, beyin omurilik sıvısı proteinleri, kan ve idrar testleri, genetik risk profilleri gibi farklı biyobelirteç tekniklerinden faydalanılır. Bazı çalışmalar nörogörüntüleme kullanılarak yapılan teşhisler diğer tekniklere göre daha popüler ve başarılı olduğunu göstermiştir. Nörogörüntüleme biyobelirteçleri de kendi içinde farklı türlere ayrılır. Genel olarak



nörogörüntüleme teknikleri Yapısal görüntüleme (MRI ve BT), Fonksiyonel görüntüleme (fMRI ve PET), Moleküler görüntüleme (PET, fMRI ve SPECT) olarak sınıflandırılır. AH tanısında MR (manyetik rezonans) görüntüleme en yaygın kullanılan yöntemdir. AH sebebiyle meydana gelen beyindeki hacimsel değişimler ve dejenerasyon MR görüntüsünden gözlemlenebilir.

AH teşhisi için literatürde bilim insanları farklı biyobelirteçler ve farklı yöntemler ile çalışmalar mevcuttur. Gray ve arkadaşları [3] AH'yi sınıflandırmak için rastgele orman algoritması tabanlı bir yaklaşım kullandılar. Sınıflandırma için MR, florodeoksiglukoz (FDG) PET, beyin omurilik sıvısı (BOS) ve genetik bilgi biyobelirteçlerini birleştirerek kullanmışlardır ve AH sınıflandırmasında %89 doğruluk elde etmişlerdir. Hong ve arkadaşları [4] AH tahmini için tekrarlayan sinir ağı (RNN) türü olan uzun kısa süreli bellek ağı (LSTM) kullandılar. Freesurfer yazılımı kullanarak MR, PET ve Difüzyon Tensör Görüntüleme (DTI) verilerinden özellikler kullandılar. LSTM modeli sayesinde hastanın zamansal verilerini kullanarak sınıflandırmadan ziyade hastalığın gelecekteki durumunu tahmini üzerine bir yaklaşım önerdiler. Dukart ve arkadaşları [5] FDG-PET ve MR görüntülerinden elde ettikleri bileşik verileri kullanarak AH sınıflandırmasında destek vektör makinelerinin kullanılmasını önerdiler. Çalışmalarında modeli ADNI veri setinden 56 kişiye ait görüntülerini ve başka bir klinikten toplanılan 34 kişinin görüntüsünü kullandılar. Sonuç olarak MR ve FDG-PET bulgularını birleştirmenin AH tespitinde önemini vurguladılar. Shankar ve arkadaşları [6] AH teşhisi için grup gri kurt optimizasyon tekniği kullanarak karar ağacı, k-en yakın komşu algoritması ve CNN modeli kullandı. MR görüntüleri kullanılarak yapılan çalışmada grup gri kurt optimizasyon tekniğinin başarımı artırdığı gözlemlenmiştir. Hosseini ve arkadaşları [7] 2016 yılında ADNI veri setinden 70 AH, 70 HBB ve 70 normal kontrol (NK) sMRI kullanarak AH biyobelirteçlerini yakalayıp genel özelliklerini öğrenebilen 3D CNN kullanan AH tespiti çalışması yaptılar. 3D CNN modeli beyindeki değişimleri yakalayabilmesi amacıyla önceden eğitilmiş 3D evrişimli otomatik kodlayıcı kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda 3D CNN modelinin diğer klasik modellere göre daha başarılı olduğunu kanıtladılar. Payan ve Montana [8] 2015 yılında yaptıkları çalışmada ADNI veri setinden 755 AH, 755 HBB, 755 NK MR görüntüsü kullanarak seyrek otomatik kodlayıcılarla önceden eğitilmiş 2D CNN ve 3D CNN ile AH, HBB ve NK sınıflandırması yapmıştır. 2D CNN ile %85,53 doğruluk, 3D CNN ile yapılan çalışmalarında ise %89,47 doğruluk oranı elde etmişlerdir. AH ve NK ikili sınıflandırmada ise %95 doğruluk oranına ulaşmışlardır. Sahumbaiev ve arkadaşları [9] 2018 yılında MR görüntülerinden Alzheimer sınıflandırılması için 3D CNN (HadNet) mimarisini önerdiler. İstatistiksel parametrik haritalama araç kutusu kullanılarak MR görüntüleri normalleştirilmiş ve kafatası soyma işlemi yapmışlardır. Sonrasında HadNet hipermetrelerini Bayes optimizasyon prosedürü uyguladılar. ADNI veri setinden 185 AH, 185 HBB, 160 NK MR görüntüsüyle yaptıkları çalışmadan %88,31 doğruluk oranı elde ettiler. Hon ve Khan [10] 2017 yılında OASIS (Open Access Series of Imaging Studies) veri tabanından 100 AH ve 100 NK sMRI ile AH sınıflandırması yapmışlardır. Çalışmalarında önceden eğitilmiş CNN mimarilerinden olan VGG16 ve Inception modellerini transfer öğrenme ile kullanmışlar ve Inception V4 modeli ile %96,25 değerinde yüksek doğruluk oranı elde etmişlerdir. Koroloev ve arkadaşları [11] ADNI önışlenmiş MR verilerini kullanarak AH tespitine yönelik çalışma yapmışlardır. 3D CNN tabanlı ResNet ve VGGNet'e benzer VoxCNN mimarileri kullanarak AH KN sınıflandırmasında iki modelde de %80 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Sarraf ve Tofighi [12] AH'yi sınıflandırmak için CNN mimarisi olan LeNet-5 ağını kullandılar. ADNI üzerinden 28 AH ve 15 NK olmak üzere toplam 43 farklı kişinin fMRI görüntü verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada %96,85 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Helaly ve arkadaşları [13] 75'er farklı kişiye ait AH, geç hafif bilişsel bozukluk, erken hafif bilişsel bozukluk ve NK MR görüntülerini ADNI'den alarak çalışma yapmışlardır. Veri artırımı yaparak veri adedini 48000 MR görüntüsüne çıkarmışlar ve veri normalleştirme yapmışlardır. 2D CNN, 3D CNN ve transfer öğrenme ince ayar yapılmış VGG19 modellerini kullanarak yaptıkları çalışmada çoklu sınıflandırmada en yüksek doğruluk oranını önerdikleri VGG19 modeli ile elde etmişler, ikili sınıflandırmalardan AH ve NK sınıflandırmasında ise her modeldeki doğruluk oranı yaklaşık %97 olmuştur. Vu ve arkadaşları [14] MR ve PET görüntülerini bir arada kullanarak AH teşhisine odaklanmışlardır. Seyrek Otomatik Kodlayıcılar ve CNN kullanılarak AH KN sınıflandırmasında %91 doğruluk elde etmişlerdir.

Literatürde AH tespitine yönelik çalışmalar oldukça yoğun olmasına rağmen konunun önemi sebebiyle halen gelişime aç bir konudur. Doğru sınıflandırma tekniklerini bulmak ve kıyaslamak önem arz etmektedir. Bu çalışmada AH sınıflandırılması kapsamında 2D CNN mimarilerinden olan YOLOv4 ve 3D CNN modelleri kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan veriler ADNI (The Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative) veritabanından başvuru süreci tamamlanarak elde edilmiştir. Çalışmada ilk olarak orijinal MR görüntüleri kullanılarak 2D CNN yöntemi ile sınıflandırma işlemini kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar neticesinde çalışmanın sonraki aşamasında ön işlenmiş MR görüntüleri üzerinde daha başarılı sonuçlar elde edilebileceği öngörülmüş ve 2D CNN yöntemi yerine 3D CNN yöntemi kullanılmıştır.

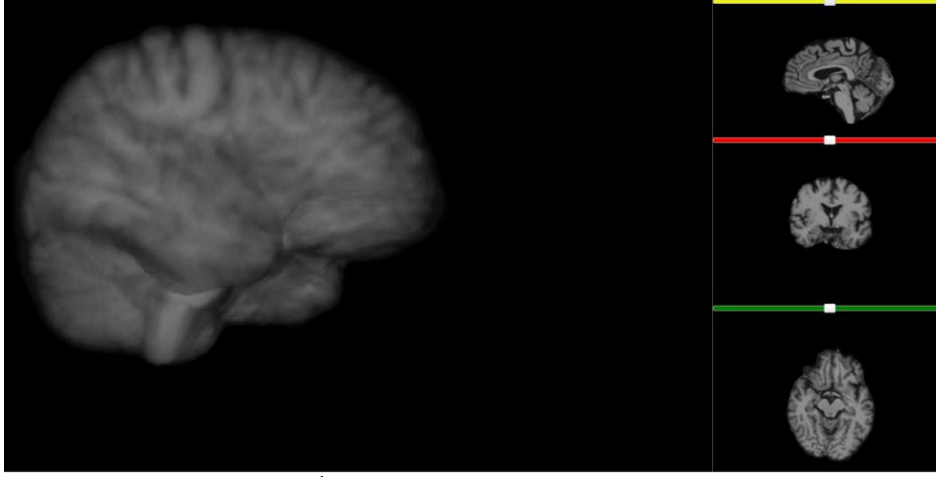
Çalışmanın ilk aşamasında 464 AH ve 864 NK olmak üzere; 1,5 T ağırlıklı 3 boyutlu orijinal MR görüntüleri veriseti olarak kullanılmıştır. Verinin orijinal MR görüntüsü olması sebebiyle veride kafatası, göz, burun boşluğu gibi görüntüler bulunmaktadır. Orijinal MR görüntüsüne ait örneğin görselleştirilmiş hali Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Kullanılan orijinal MR görüntüsünün görselleştirilmiş hali

AH sınıflandırmasında beyin dışında kalan bölgelerin bulunmaması gereklidir aksi halde sınıflandırma başarısını düşürecektir. Beyin görüntülerinin sınıflandırılmasında kafatası soyma ve beyin çıkarma işlemleri literatürde kullanılan tekniklerdir. Bu amaçla Brain Extraction Tool (BET) ile FMRIB’s Software Library (FSL) yazılımları kullanılarak kafatası soyma ve beyin çıkarma işlemi uygulanmıştır [15]. FSL yazılımının BET aracı tüm kafa görüntüsünden beyin dışı dokuyu eşik değer olarak çıkarmakta ve beyin dokusunu vermektedir. MR görüntüleri NIFTI (Neuroimaging Informatics Technology Initiative) dosya tipindedir ve 256×256×256 boyutlarındadır. Veri modele girmeden önce 2 boyuta med2image yardımcı programı ile indirgenmiştir. Bu aşamada her bir NiFTi tipindeki MR görüsünden 2 boyutlu görüntüler elde edilmiştir ve bu görüntüler aksiyal, sagittal ve koronal beyin eksenlerine ait çok dilimli 3 farklı düzlem görsellerinden oluşmaktadır. Çalışma için diğerlerine göre daha çok bilgi içeren aksiyal eksenini içerisinden orta dilim görüntüleri seçilmiştir. Ayrıca bilgi içermeyen görüntüler çıkarılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında önışleme sırasında oluşan veri kayıplarını en aza indirmek için FreeSurfer yazılımı ile işlenmiş 3D MR görüntüleri kullanılmıştır. FreeSurfer programı yaygın olarak kullanılan atlas tabanlı bir yöntemdir, MR görüntüsünü yeniden örnekleme, beyin harici kısımları çıkarma, atlas görüntüsü ile normalizasyon gibi işlemler gerçekleştirir. İlgili verinin Brain Viewer Toolkit kullanılarak görselleştirilmiş hali Şekil 3’te verilmiştir [16].



Şekil 3. İşlenmiş MR görüntüsünün görseli [59]

FreeSurfer ile işlenmiş olan MR görüntüleri farklı yaştan ve cinsiyetten insanlara aittir. Ayrıca ADNI çalışması katılımcıların genellikle 6 ayda bir yeni MR görüntülerini almakta ve analiz etmektedir. Kullanılan veri setinde de bir katılımcının 1, 2, 3 veya 4 kez farklı zaman dilimlerinde MR görüntüsü vardır. Toplam 430 farklı kişiye ait 99 AD ve 231 NK MR görüntüsü varken birden fazla kliniği ziyaretleri sonucu toplam 1439 MR görüntüsü veri setine eklenmiştir ve bunların 602'si AH, 837'si NK bireylerine aittir. Veri setindeki yaş ve sınıf dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan veri seti özellikleri

Yaş Grubu	AH	NK
50-59	19	0
60-69	84	24
70-79	282	588
80-89	209	220
90-99	8	5

## 2.1. Metot

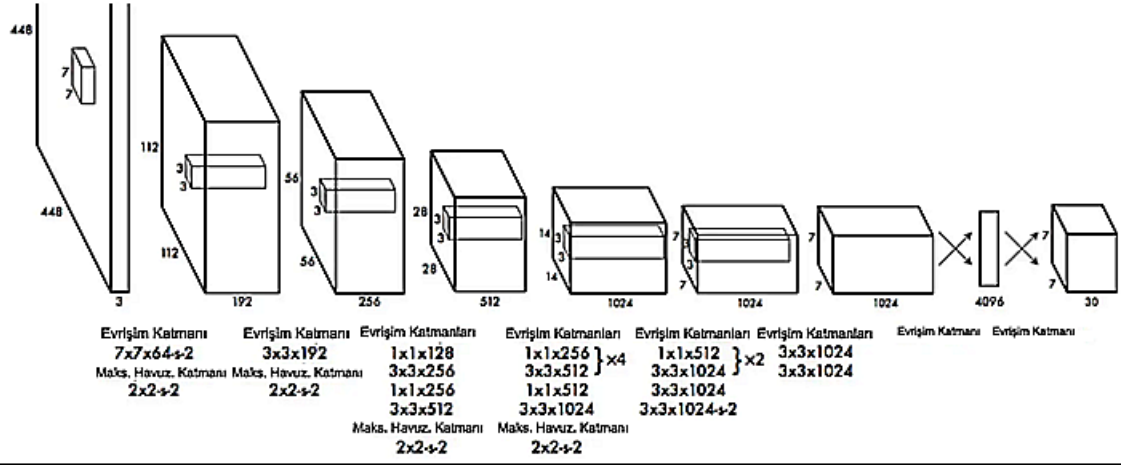
Yapay zeka insan zekasına özgü olan muhakeme, algılama, öğrenme, düşünme, sonuç çıkarma ve karar verme gibi yetenekleri sergileyebilen bir teknolojidir. Derin öğrenme yapay zekanın alt kümesidir ve makine öğreniminden farklı olarak veride özellik çıkarımı yapan bir uzmana gereksinim duymaz [17].

Yapay sinir ağları derin öğrenmenin temelini oluşturur. Beyin nöronlarının taklit edilmesi evrişimli sinir ağına dayanan yapay sinir ağları üç çeşit katmandan oluşmaktadır: girdi katmanı, gizli katman, çıkış katmanı. Girdi katmanı yapay sinir ağları mimarisinin ilk katmanıdır ve verinin girdi olarak alınmasından sorumludur. Gizli katman kendine gelen veriyi işler ve kendinden sonra gelen katmana iletir; gizli katman sayısı ve nöron sayısının fazla olması durumunda mimari derin sinir ağları yapısı gerçekleşir. Çıkış katmanı ise yapay sinir ağlarının en son katmanıdır, gelen veriyi fonksiyon yardımı ile işleyerek çıktığı belirlemekten sorumludur.

Evrişimli sinir ağları (CNN) özellikle görüntü verisi ile çalışılan çalışmalarda öne çıkan bir mimaridir. Yapay sinir ağlarının bir sınıfıdır. Evrişim katmanı, havuzlama katmanı ve tam bağlantı katmanından oluşan yapıya sahiptir. YOLO (You Only Look Once) algoritması konvolüsyonel sinir ağları kullanarak nesne tespiti yapan bir algoritmadır.

### 2.1.1. YOLO Algoritması

YOLO 2015 yılında Joseph Redmon tarafından tanıtılmıştır [18]. YOLO nesnelere gerçek zamanlı olarak algılayabilen ve evrişimli sinir ağı yöntemi kullanan bir algoritmadır. "Sadece Bir Kez Bak" şeklinde açılımı olan ismini tek aşamalı nesne dedektörü olmasından alır. Görüntüdeki farklı bölgelerde sınıflandırma işlemini tekrar yapmak yerine, YOLO giriş görüntüsünün bütün özelliklerini hesaplayıp tüm nesnelere için aynı anda tahminlemeleri yapabilir. YOLO hem işlem hızındaki başarısı hem de yüksek doğruluk oranları ile popüler hale gelmiştir. YOLO mimarisi Şekil 4'te verilmiştir [18].



Şekil 4. YOLO Mimarisi [17]

YOLO algoritması girdi olarak verilen görüntüyü  $S \times S$  boyuttaki ızgaralara bölmektedir. ızgaraların her biri kendi içerisinde hedef olarak aranan nesne var mı kontrol eder, eğer varsa nesnenin orta noktası ızgaranın içinde olup olmadığını bulur. Nesnenin orta noktasına sahip olan ızgara nesneye ait sınırlayıcı kutuyu (bounding box) çizmekle sorumludur. Bounding box nesnenin içinde bulunduğu kapalı çerçeveye verilen isimdir.

Her bounding box'ın tanımlayıcı özellikleri vardır: bounding box'ın merkez konumu ( $B_x, B_y$ ), nesnenin genişliği ( $B_w$ ), nesnenin yüksekliği ( $B_h$ ), tahmin edilen sınıf ( $obj$ ), ızgara içinde nesne bulunma tahminin olasılığı ( $P(obj)$ ) ve nesnenin varlığını ve yokluğunu yansıtan güven skoru [19]. Güven skorunun evrişimli sinir ağlarının hesaplanması Denklem 1'de verilmiştir. Bu sayede her ızgaranın ayrı tahmin vektörü oluşmuş olur.

$$\text{Güven Skoru} = p(obj) * IoU_{Tahmin}^{Gerçek} \quad (1)$$

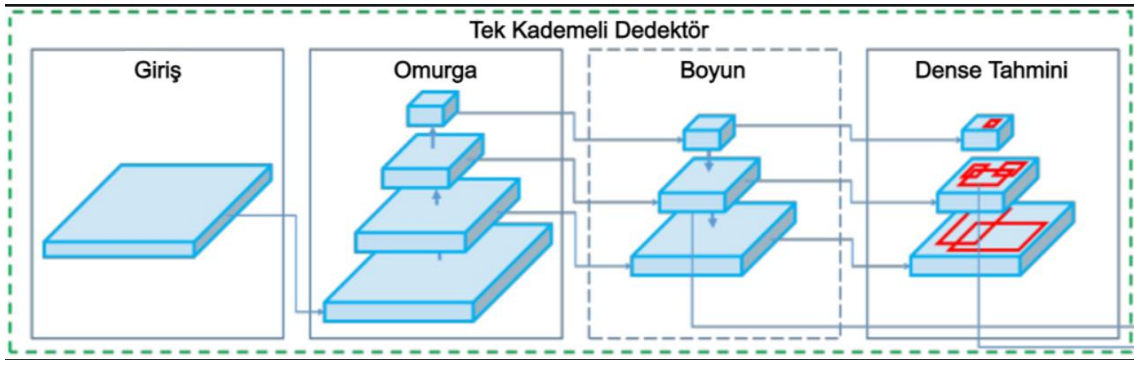
IoU (Intersection over Union) değeri tahmin edilen kutu ile gerçekte nesnenin bulunduğu kutunun örtüşme oranını gösterir. IoU değeri ne kadar yüksekse tespit edilen nesnenin doğruluğu o kadar yüksektir [20]. IoU hesaplamasına ait görsel Şekil 5'te verilmiştir.  $P(obj)$  değeri 0 ile 1 aralığındadır, dolayısıyla değer 0'a ne kadar yakınsa ilgili ızgarada nesnenin bulunma ihtimali düşüktür ve güven puanı da 0'a yakın çıkacaktır.

$$IoU = \frac{\text{Örtüşme alanı}}{\text{Bileşim alanı}} = \frac{\text{Örtüşme alanı}}{\text{Bileşim alanı}}$$

Şekil 5. IoU (Intersection over Union) değeri hesaplaması

YOLO algoritmasında ızgaraların içerisinde nesne tahmini yapmasıyla gereksiz bounding box'lar oluşabilir. Bu problemi aşmak için Maksimum Olmayanı Bastır (Non-Maximum Suppression) algoritması kullanılır [21]. Algoritma bounding box'ların güven skorlarını kıyaslar. En yüksek güven skoru olan kutuyu referans olarak diğer bounding box'ların herbiri ile IoU değerini hCNN'ler. IoU değeri önceden belirlenen eşik değerini aşıyorsa ilgili bounding boxların çerçevelediği nesnelere aynı nesne olarak kabul eder ve düşük güven skoru olan bounding box'ları kaldırır [22].

YOLOv4 ise, 2020'de piyasada tanıtılan ve COCO veri setinde en yüksek performansı sağlayan gerçek zamanlı bir nesne algılama modelidir [23]. Nesne tespit çalışmaları incelendiğinde YOLO v4'ün önceki versiyonlara kıyasla daha başarılı sonuçlar üretebildiği görüldüğü için YOLO v4 bu çalışmada kullanılmıştır [24,25]. Kullanılan YOLOv4 mimarisi Şekil 6'da verilmiştir [23]. Giriş verileri görüntü çözünürlüğü 416x416 olarak değiştirilmiştir.



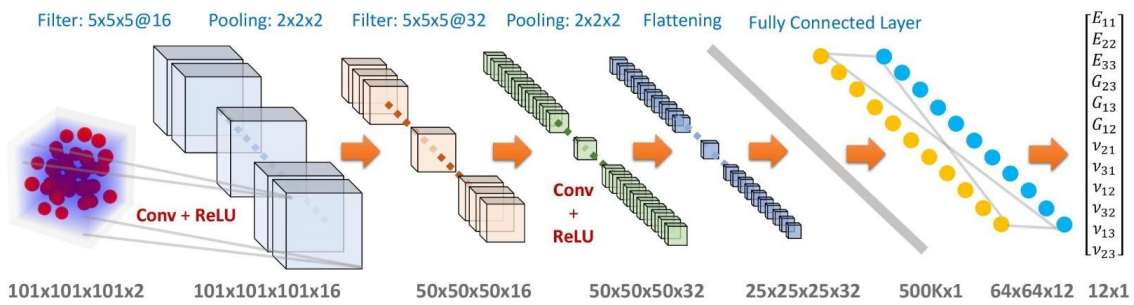
Şekil 6. YOLOv4 mimarisi [22].

### 2.1.2. Üç boyutlu evrişimli sinir ağı

Çalışmada kullanılan MR görüntüleri çok dilimli verilerden oluşmaktadır, bu tür verilerde 2 boyutlu (2D) CNN kullanılmasının güvenilir olup olmadığı tartışılmaktadır [26]. 2D CNN sadece eğitilen dilimlere göre tahminleme yapacak ve tahminleme işlemini test verilerinde yine modele verilen dilimler üzerinde gerçekleştirecektir. Ayrıca sayıca az piksellerin değişimi bile yanlış sonuçlar verilmesine neden olacaktır [27]. 2D CNN yöntemlerinde 2 boyutlu filtreler ve havuzlama işlemleri kullanılır, bu da süreç ilerledikçe özelliklerin hiyerarşisinin karmaşıklaşmasına sebep olur [28]. 2D CNN yöntemlerinin birçoğu MR görüntülerindeki hacimsel bölgeleri bütünüyle inceleyemez, sadece iki boyutlu dilimleri araştırabilir. Bu sebeplerle 3 boyutlu (3D) CNN yöntemi, 2D CNN yöntemine göre daha güvenilir olacaktır. Bu sayede MR görüntüsündeki aksiyal, sagittal ve koronal boyutları kullanılmış olur ve tüm beyin hacminin değerlendirilmesine olanak sağlar. Ayrıca 2D CNN işleminde gereken uygun dilim seçimi, dilimleri düzeltme ve eleme işlemleri gibi ön işlemlere 3D CNN’de gerek kalmaz. 3D CNN yönteminde 3D evrişimli filtreler kullanılarak beyin dokusundaki varyasyonlarda daha güçlü bağlamsal özellikler sağlanır [29,30].

3D CNN zamansal veya hacimsel bilginin önemli olduğu problemlerde kullanılması gereklidir. Video gibi 2 boyutlu birçok görüntüden oluşan verilerde konumlandırma, nesne tespiti gibi uygulamalarda kullanılır. Benzer şekilde MR verileri de 3 boyutlu olduğu için 3D CNN yöntemi tercih edilmiştir.

3D CNN mimarisinde 2D CNN mimarisinden en temel farkı 3D filtreler ve 3D havuzlama tekniği kullanılmasıdır. Evrişim katmanları arasında x, y ve z düzlemlerinde hareket eden filtreler evrişim haritasını oluşturur. Örnek bir 3D CNN mimarisi Şekil 7’de verilmiştir [31].



Şekil 7. Örnek 3D CNN Mimarisi [31]

3D MR görüntülerini sınıflandırmak için 3D CNN modeli kullanılmıştır. Kullanılan modelin mimarisi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan 3D CNN mimarisi

Katman (tip)	Çıkış Şekli	Parametre
input_1 (InputLayer)	(None, 128, 128, 64, 1)	0
conv3d (Conv3D)	(None, 126, 126, 62, 64)	1792
max_pooling3d (MaxPooling3D)	(None, 63, 63, 31, 64)	0
batch_normalization (BatchNo)	(None, 63, 63, 31, 64)	256
conv3d_1 (Conv3D)	(None, 61, 61, 29, 64)	110656

max_pooling3d_1 (MaxPooling3)	(None, 30, 30, 14, 64)	0
batch_normalization_1 (Batch)	(None, 30, 30, 14, 64)	256
conv3d_2 (Conv3D)	(None, 28, 28, 12, 128)	221312
max_pooling3d_2 (MaxPooling3)	(None, 14, 14, 6, 128)	0
batch_normalization_2 (Batch)	(None, 14, 14, 6, 128)	512
conv3d_3 (Conv3D)	(None, 12, 12, 4, 256)	884992
max_pooling3d_3 (MaxPooling3)	(None, 6, 6, 2, 256)	0
batch_normalization_3 (Batch)	(None, 6, 6, 2, 256)	1024
global_average_pooling3d (GI)	(None, 256)	0
dense (Dense)	(None, 512)	131584
dropout (Dropout)	(None, 512)	0
dense_1 (Dense)	(None, 1)	513

3D CNN modeline eğitilmesi için 562 NK ve 451 AH MR görüntüsü olarak toplamında 1013 MR görüntüsü eğitim kümesine seçilmiştir. Validasyon veri seti için ise 126 KN, 90 AH olmak üzere toplamda 216 MR görüntüsü seçilmiştir. Geriye kalan 216 MR görüntüsü de test veri seti olarak belirlenmiştir.

Görüntü verisinde modeli daha fazla veriyle destekleyebilmek için veri artırımı yapılmıştır. Veri artırımı eğitim veri setine %10 oranında artırımı yönelik dikey eksende ayna simetrisi alınarak yapılmıştır.

Her veri eğitim sürecine girmeden önce  $128 \times 128 \times 64$  boyutlarına indirgenmiştir. Bu sayede modelin çalışması hızlandırılmıştır.

### 3. Bulgular

YOLOv4 ile yapılan çalışma sonuçlarına ilişkin karışıklık matrisi sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Çalışma sonucunda doğruluk değeri 0,68 bulunurken F1 skor değeri ise 0,67 olarak bulunmuştur. 2D YOLOv4 ile yapılan çalışmanın sonucu AH tespiti için başarılı olmamıştır.

**Tablo 3.** YOLOv4 modeline ait karışıklık matrisi çıktısı

Karışıklık Matrisi		Tahmin Edilen Sınıf	
		Pozitif (AH)	Negatif (KN)
Gerçek Sınıf	Pozitif (AH)	62	8
	Negatif (KN)	54	67

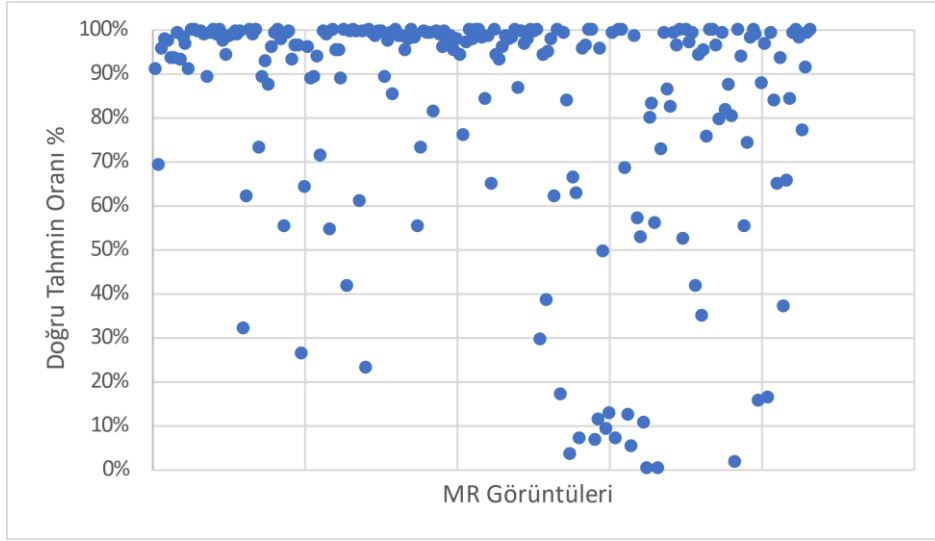
Elde edilen başarı oranlarını yükseltmek için literatürde 3D CNN modeli sıklıkla önerilmiştir. 3D CNN kullanılarak MR görüntüleri aksiyal, sagittal ve koronal olmak üzere 3 farklı düzlemde incelenebilir, herhangi bir dilim seçimi ve dilim kaybı yaşanması gerekmez. MR görüntüleri 3 boyutlu düzlem şeklinde ele alındığında Alzheimer hastalığından kaynaklı hacimsel değişimler de daha net saptanabileceği öngörülmüştür. Bu sebeplerle çalışmanın devamında 3D CNN modeli ile devam edilmiştir.

3D CNN ile yapılan deney çalışmasının sonuçları Tablo 4'te karışıklık matrisinde verilmiştir.

**Tablo 3.** 3D CNN modeline ait karışıklık matrisi çıktısı

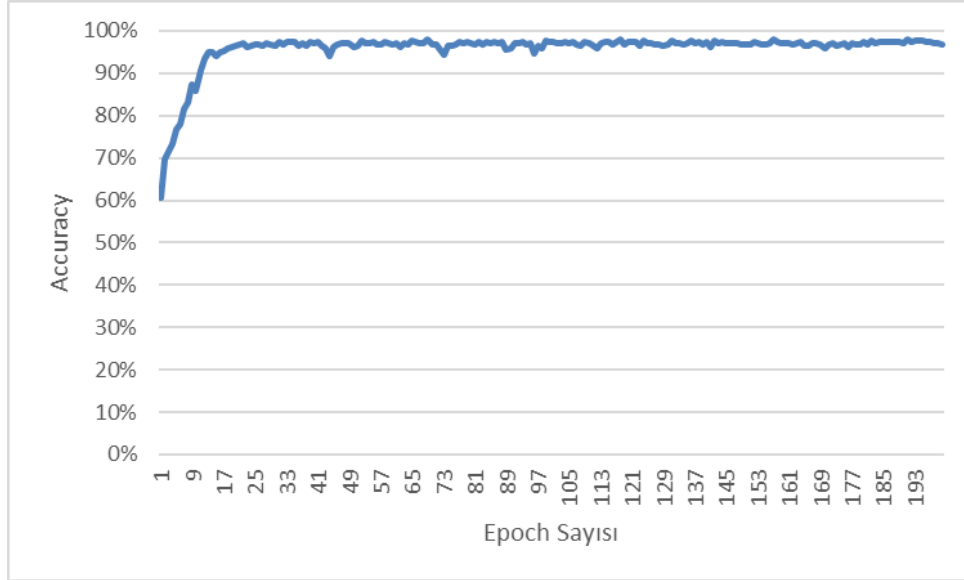
Karışıklık Matrisi		Tahmin Edilen Sınıf	
		Pozitif (AH)	Negatif (KN)
Gerçek Sınıf	Pozitif (AH)	68	22
	Negatif (KN)	4	122

3D CNN modeline ilişkin her bir test MR görüntüsünün tahminlemede ettiği doğruluk oranları Şekil 8'de verilmiştir, grafik her MR için gerçek sınıfa ne kadar yakın değer tahmin ettiğini göstermektedir. Görüldüğü üzere 3D CNN modeli tahminlemede oldukça başarılıdır, yanlış tahmin ettiği sınıflarda bile çoğunlukla arada kalmıştır, yanlış tahminlerin çok azında yüksek oranda yanlış olduğuna karar kılınmıştır.



Şekil 8. 3D CNN modeline her bir MR görüntüsünün doğru sınıflandırılma oranı

3D CNN modeline ait doğruluk grafiği ise Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'daki doğruluk grafiği incelendiğinde modelimizin düşük epoch'larda bile yüksek doğruluk oranına çıktığı görülebilir.



Şekil 9. 3D CNN modeline epoch sayısına göre doğruluk değeri

Sistemin başarısını değerlendiren ve ilgili çalışmada kullanılan metriklerin eşitlikleri aşağıda verilmiştir. True Positive (TP) gerçekte hasta olan ve sistemin hasta olarak tahmin etmesi durumudur. True Negative (TN) gerçekte sağlıklı olanları sistemin de sağlıklı olarak sınıflandırması durumudur. False Positive (FP) sağlıklı olan görüntüyü modelin hasta olarak tahmin etmesidir. False Negative (FN) ise gerçekte hasta kişiye ait olan görüntüyü modelin sağlıklı olarak sınıflandırmasıdır.

Doğruluk metriği hasta veya sağlıklı ayrımı gözetmeksizin tüm tahminlerin ne kadarının doğru olduğunu veren ölçüdür. Doğruluk metriğinin hesaplanması Denklem 2'de verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN} \quad (2)$$

Kesinlik metriği özellikle FP tahmininin önemi büyük olduğu durumlarda dikkat edilmesi gereken bir metriktir, Denklem 3 kullanılarak hesaplanır.

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

Duyarlılık metriği özellikle FN tahmininin önemi büyük olduğu durumlarda dikkat edilmesi gereken bir metriktir, Denklem 4 kullanılarak hesaplanır.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

F1 skor, Dengesiz verilerde değerlendirme metriği olarak tercih edilmektedir. Kesinlik ve duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasıdır, Denklem 5'te hesaplanması verilmiştir.

$$F1\ Skor = 2 * \frac{Kesinlik \times Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık} \quad (5)$$

Kullanılan YOLOv4 modeli ile 3D CNN modellerinin başarımları metrikleri ile karşılaştırılması yapılmış olup Tablo 5'te verilmiştir. 3D CNN modelinin karşılaştırılan bütün metriklerde 2D CNN modeline kıyasla daha başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.

**Tablo 5.** 2D CNN ile 3DCNN modellerinin karşılaştırılması.

Doğruluk Metrikleri	2D CNN (YOLOv4)	3D CNN
Doğruluk	0,68	0,88
Kesinlik	0,53	0,94
Duyarlılık	0,89	0,76
F1 Skor	0,67	0,84

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Tıp alanına yönelik yapılan yoğun araştırmalar sayesinde tıp geçmişten bugüne büyük gelişme göstermiştir. Günümüzde tıp alanındaki çalışmalar bilgisayar karar destek sistemleri ile daha üst seviyelere çıkmıştır. Yapay zeka sayesinde hastalık tanısı, tedavi süreci, hastalığın takibi gibi işlemler yazılımlar aracılığıyla yapılabilmektedir. Bu sayede uzman doktorlara yardımcı karar destek sistemleri oluşturulabilir. Fakat sağlık alanında birçok çalışma yapılmasına rağmen bu araştırma konusu halen yeni çalışmalar ihtiyaç duymaktadır. Çünkü sağlık, hata toleransını affetmeyen sonu ölümlerle sonuçlanabilen bir alandır. Yapay zeka çalışmaları şuan popüler olduğu gibi gelecekte de gelişmeye devam ederek insanlara yol göstermeye devam edecektir. Özellikle tıp alanında yapılan çalışmalar insanlığa katkı sunmaktadır.

AH günümüzde tedavisi bulunmayan fakat erken teşhisle ilerlemesi yavaşlatılabilen bir hastalıktır. Bu nedenle hastalığın erken teşhis edilebilmesi büyük önem teşkil etmektedir. AH sınıflandırmasında yapılan çalışmaların yalnızca belli metriklere göre kıyaslanması objektif bir yaklaşım değildir. Çalışmalarda kullanılan veri setleri ve veri sayıları farklılık göstermektedir, ayrıca verilerin her birinin farklı hastalara ait olup olmadığı çoğu literatür çalışmasında belirtilmemiştir. Çoğu çalışma ADNI veri setini kullanmış fakat ADNI veri seti aynı hastaya ait 1'den fazla nörogörüntüleme sunabilmektedir, bu ayrıntının sonuçları etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri setindeki farklı kişi sayısı özellikle belirtilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda sınıflandırılan veriler çoğunlukla homojen olmadığı için doğruluk değerinin karşılaştırma kriteri olarak kabul edilmesi de yetersiz kalabilir. Ayrıca yapılan çalışmalarda görüntüye ön işlem uygulamaları birbirinden farklılık göstermektedir. Özellikle nörogörüntülerde ön işlem adımlarının çalışma sonuçlarını doğrudan etkilediği bilinmektedir.

İlgili çalışmada MR görüntülerinden AH ve NK sınıflandırılması yapılmıştır. ADNI veri tabanından farklı yaş ve cinsiyetlerden kişilere ait MR görüntüleri kullanılmıştır. Yöntem olarak CNN metodlarından YOLOv4 ve 3D CNN ile çalışılmıştır. 3D CNN modelinin elde ettiği sonuçlar 2D CNN modelinin elde ettiği sonuçlara göre başarılı çıkmıştır. YOLOv4 modelinin sınıflandırma metriklerinden doğruluk 0,68, kesinlik 0,58 duyarlılık ve F1 skor 0,67 oranlarında sınıflandırma sonucu gözlemlenirken, 3D CNN modeli ile çalışma sonuçlarında 0,88 doğruluk 0,94 kesinlik, 0,76 duyarlılık ve 0,84 f1 skor oranları elde edebilmiştir. 3D CNN modelinin güvenilirliği daha yüksek ve doğruluk metrikleri daha başarılıdır. MR görüntüleri aksiyal, sagittal ve koronal olmak üzere 3 düzlemden oluşur. 2D modellerde bu düzlemlerden yalnızca aksiyal seçildiği için ve dilimler arasında en çok bilgi içerdiği kabul edilen orta dilim seçildiği için veri kaybı oluşabilmektedir, bu da modelin başarımlarını düşürmektedir. 3D modellerde



verinin tamamını öğrenme sürecine dahil edebilir. Ayrıca AH tespitinde hacimsel değişimler tanı tespitinde büyük önem sahibidir. Hacimsel değişimler 3D modellerde daha iyi eğitilebilir ve değerlendirilebilir. Bu sebeplerle 3D CNN modeli 2D CNN modeline göre daha başarılı çıkmıştır.

Gelecek çalışmalarda Alzheimer'ın ilerlemeli bir hastalık olduğu bilindiği için ilerleyişinin tahmini üzerine çalışmalar yapılması hedeflenmektedir. Bu sayede uzman doktorlar için rehber niteliğinde AH bireyin ilerleyen süreçte ne tür rahatsızlıklar yaşayacağını tahmin etmede kolaylık sağlanabilir.

## Kaynakça

- [1] Keskin, M., 2021. Alzheimer Hastalarına Bakım Verenlerin Kaygı, Stres, Başetme Stilleri ve Yaşam Deneyimleri. Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 14.
- [2] 2020 Alzheimer's disease facts and figures. *Alzheimer's & Dementia*, 16: 391-460.
- [3] Breijyeh, Z.; Karaman, R., 2020. Comprehensive Review on Alzheimer's Disease: Causes and Treatment. *Molecules*, 25: 5789. <https://doi.org/10.3390/molecules25245789>
- [4] Gray, K. R., Aljabar, P., Heckemann, R. A., Hammers, A., Rueckert, D., and Alzheimer's Disease Neuroimaging, I., 2013. Random forest-based similarity measures for multi-modal classification of Alzheimer's disease. *Neuroimage* 65, 167–175.
- [5] Hong, X., Lin, R., Yang, C., Zeng, N., Cai, C., Gou, J., Yang, J., 2019. Predicting Alzheimer's disease using LSTM. *IEEE Access*, 7, 80893-80901.
- [6] Dukart, J., Mueller, K., Barthel, H., Villringer, A., Sabri, O., Schroeter, M. L., & Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, 2013. Meta-analysis based SVM classification enables accurate detection of Alzheimer's disease across different clinical centers using FDG-PET and MRI. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 212(3), 230-236.
- [7] Shankar, K., Lakshmanprabu, S. K., Khanna, A., Tanwar, S., Rodrigues, J. J., & Roy, N., R., 2019. Alzheimer detection using Group Grey Wolf Optimization based features with convolutional classifier. *Computers & Electrical Engineering*, 77, 230-243.
- [8] Hosseini-Asl, E., Keynton, R., El-Baz, A., 2016. Alzheimer's disease diagnostics by adaptation of 3D convolutional network, 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 126-130, doi: 10.1109/ICIP.2016.7532332.
- [9] Payan, A., Montana, G., 2015. Predicting Alzheimer's disease: a neuroimaging study with 3D convolutional neural networks. arXiv preprint arXiv:1502.02506
- [10] Sahumbaiev, I., Popov, A., Ramírez, J., Górriz, J. M., Ortiz, A., 2018. 3D-CNN HadNet classification of MRI for Alzheimer's Disease diagnosis, 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), 1-4, doi: 10.1109/NSSMIC.2018.8824317.
- [11] Hon, M. and Khan, N., 2017. Towards Alzheimer's Disease Classification through Transfer Learning. arXiv preprint arXiv:1711.11117.
- [12] Korolev S, Safiullin A, Belyaev M, Dodonova Y. Residual and plain convolutional neural networks for 3d brain MRI classification Sergey Korolev Amir Safiullin Mikhail Belyaev Skolkovo Institute of Science and Technology Institute for Information Transmission Problems, 2017 IEEE 14th Int. Symp. Biomed. Imaging (ISBI 2017). 2017;835–838.
- [13] Sarraf, S., Tofighi, G., 2016. Deep learning-based pipeline to recognize Alzheimer's disease using fMRI data, 2016 Future Technologies Conference (FTC), 816-820.
- [14] Helaly, H., A., Badawy, M., Haikal, A., Y., 2022. Deep Learning Approach for Early Detection of Alzheimer's Disease. *Cognitive Computation*, 14, 1711–1727.
- [15] S. M. Smith. Fast robust automated brain extraction. *Human Brain Mapping*, 17(3):143-155, November 2002.
- [16] Vu, T., D., Yang, H., -J., Nguyen, V., Q., Oh, A., -R., Kim, M., -S., 2017. Multimodal learning using convolution neural network and Sparse Autoencoder, 2017 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), 309-312.
- [17] Janiesch, C., Zschech, P., Heinrich, K., 2021. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685-695.
- [18] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A., 2016. You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 779-788.
- [19] Thuan, D., 2021. Evolution of yolo algorithm and yolov5: the state-of-the-art object detection algorithm, Oulu University of Applied Sciences, Bachelor's Thesis.
- [20] Lan, W., Dang, J., Wang, Y., Wang, S., 2018. Pedestrian Detection Based on YOLO Network Model, 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1547-1551, doi: 10.1109/ICMA.2018.8484698.
- [21] Rothe, R., Guillaumin, M., Gool, L. V., 2014, November. Non-maximum suppression for object detection by passing messages between windows. In *Asian conference on computer vision*, 290-306.

- [22] Sambasivarao, K., 2022. Non-maximum Suppression (NMS). (Web sayfası: <https://towardsdatascience.com/non-maximum-suppression-nms-93ce178e177c>), (Erişim tarihi: Ekim 2022).
- [23] Bochkovskiy, A., Wang, C., Liao, H., M., 2020. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. ArXiv, abs/2004.10934.
- [24] Taşyürek, M., Öztürk, C., 2022. DDL: Çoklu kapı numarası tespit etme ve kümeleme için derin öğrenme tabanlı yeni bir yaklaşım. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37 (2), 843-856.
- [25] Alan, A., Karabatak, M., 2020. Veri Seti - Sınıflandırma İlişkisinde Performansa Etki Eden Faktörlerin Değerlendirilmesi . Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32 (2) , 531-540 .
- [26] Khagi, B., Kwon, G.-R., 2020. 3D CNN Design for the Classification of Alzheimer's Disease Using Brain MRI and PET. IEEE Access, 8, 217830-217847, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040486.
- [27] Nguyen, A., Yosinski, J., Clune, J., 2015. Deep neural networks are easily fooled: High confidence predictions for unrecognizable images, 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 427–436.
- [28] Mzoughi, H., Njeh, I., Wali, A., Slima, M., B., BenHamida, A., Mhiri, C., Mahfoudhe, K., B., 2020. Deep multi-scale 3D Convolutional Neural Network (CNN) for MRI gliomas brain tumor classification. Journal of Digital Imaging, 33(4):903-915. doi: 10.1007/s10278-020-00347-9. PMID: 32440926; PMCID: PMC7522155.
- [29] Zhou, M., Chaudhury, B., Hall, L., O., Goldgof, D., B., Gillies, R., J., Gatenby, R., A., 2017. Identifying spatial imaging biomarkers of glioblastoma multiforme for survival group prediction. Journal of Magnetic Resonance Imaging, 46(1):115–123. doi: 10.1002/jmri.25497.
- [30] Rao, C., Liu, Y., 2020. Three-dimensional convolutional neural network (3D-CNN) for heterogeneous material homogenization. ArXiv, abs/2002.07600.
- [31] Haehn, D., Rannou, N., Ahtam, B., Grant, E., Pienaar, R., 2014. Neuroimaging in the Browser using the X Toolkit. Frontiers in Neuroinformatics.

## Digital Solutions to Support Post-disaster Response and Recovery based on the Findings from Ground Zero after the 6th February 2023 Kahramanmaraş Earthquake Series

Gökçen Yılmaz\*<sup>1</sup> 

\*<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, DENİZLİ

(Alınış / Received: 30.06.2023, Kabul / Accepted: 26.09.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords

Disaster Response,  
Disaster Management,  
Earthquake,  
Digital Solutions

**Abstract:** This paper presented the list of hazards of the response and recovery operations captured based on fact-finding mission performed in Malatya at the ground zero in the aftermath of the Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence happened on February 6, 2023. The study presents the findings of semi-structured interviews with four officials from Balıkesir Metropolitan Municipality allocated to Malatya for response and recovery with a team of approximately 200 people. As a result of these interviews and field observations, hazards that impacted the ground zero operations are categorised under three response and recovery activities: 1) planning, 2) logistics and supply, and 3) communication and information management. To mitigate these hazards and support ground-zero activities, a list of low-cost digital solutions is developed based on a literature review and expert validations with two experts. The outcomes of this study highlight an urgent need for developing a systematic framework for emergency response and relief supported by a set of low-cost digital solutions to improve coordination, communication, and information management.

## 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinden Sonra Sıfır Noktası Bulgularına Dayalı Acil Durum Yönetimi ve Yardımını Destekleyecek Dijital Çözümler

### Anahtar Kelimeler

Afet Yönetimi,  
Deprem,  
Dijital Çözümler

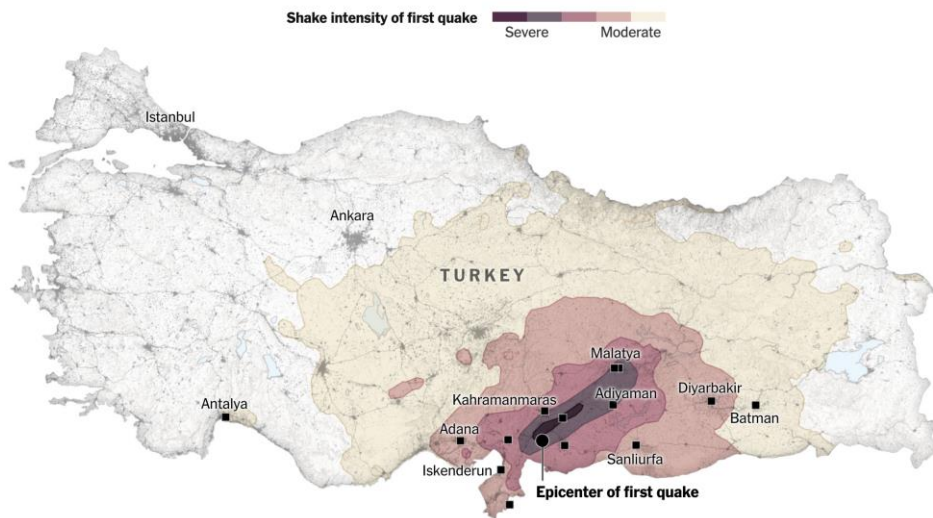
**Öz:** Bu makale, 6 Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş, Türkiye deprem dizisinin ardından deprem bölgesine intikal eden afet yönetiminden sorumlu büyükşehir belediyelerinin yürüttüğü acil durum yönetimi ve yardımı aktivitelerini Malatya özelinde incelemiştir. Bu kapsamda çalışma, Malatya afet yönetimi merkezinde acil durum operasyonlarından sorumlu olarak bulunan Balıkesir Büyükşehir Belediyesine mensup yaklaşık iki yüz kişilik bir afet yönetimi ekibinden dört kişi ile yapılan mülakatların bulgularını sunmaktadır. Saha incelemeleri ve mülakatlar sonucunda, sahada yürütülen operasyonları engelleyen tehlikeler üç acil durum yönetimi ve yardımı başlığı altında listelenmiştir. Bu engel ve tehlikelerin önlenmesi ve acil durum yönetimi ve yardımı aktivitelerinin sahada daha etkin şekilde yürütülmesi için literatür taraması ve iki uzman görüşmeleri sonucunda orta çıkan ucuz maliyetli dijital çözümler listesi önerilmiştir. Bu çalışma, saha operasyonlarını düzenlemek, koordinasyonu, iletişimi ve bilgi paylaşımını arttırmak için sistematik acil durum yönetimi ve yardımı yaklaşımına ihtiyaç olduğunu ortaya çıkararak, saha operasyonlarının dijital araçlar ile desteklenmesi gerektiğinin altını çizmiştir.

\*İlgili Yazar, email: gokceny@pau.edu.tr

## 1. Introduction

Post-earthquake response and recovery is a significant element of disaster management and risk reduction which has different forms in different countries [1], [2]. The existing body for coordinating the disaster response and supporting prefectural and local authorities is crucial for a single point of decision-making [3]. Federal Emergency Management Agency (FEMA) is the central disaster response agency in the USA responsible for preparing for, responding to, recovering from, and mitigating disasters. While these activities are coordinated by FEMA, they are conducted by the staff from federal, state, tribal and local government partners, as well as the private sector, non-governmental entities and the wider public to effectively deal with the adverse effects of disasters [4]. On the other hand, Japan, one of the countries in the world that experienced devastating earthquakes, has government-level strategies for mitigating adverse effects and recovery; and local authority-level (municipalities) action plans for carrying out other activities [5] [6]. However, the national government in Japan does not have a central agency, leading to a lack of coordination and overlapping or duplication of the effort needed in time and/or space [7] [6]. In Türkiye, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) reporting to the Ministry of Interior is the central agency responsible for designing precautionary measures and coordinating the disaster response through 81 provincial branches and 11 search and rescue units [8].

On February 6, 2023, two very large earthquakes of magnitude (Mw) 7.8 and 7.5 occurred nine hours apart on different fault lines in the southern region of Türkiye and northern Syria [9], [10]. The first earthquake occurred at 04:17 Türkiye local time and its epicentre was Pazarcık (Kahramanmaraş) which was about 35 km distant to the northwest of Gaziantep (see Figure 1). The second major earthquake occurred at 13:45 Türkiye local time and its epicentre was Elbistan (Kahramanmaraş) [9]. The two earthquakes and associated aftershocks caused widespread damage in 11 out of 81 provinces of Türkiye in the south of the country which are Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye and Şanlıurfa [11]. The most severe damage occurred in Hatay, Kahramanmaraş, Gaziantep, Malatya and Adıyaman provinces, which are home to around 6.45 million people (around 7.4 percent of the country's population) [12]. The affected people were both evacuated to other cities in Türkiye and accommodated in temporary shelters (see Figure 2).



**Figure 1.** Epicentre and shake intensity of 6<sup>th</sup> February Kahramanmaraş-Pazarcık ((Mw) 7.8) earthquake [46]

As presented in Figure 1, widespread coverage of the earthquake area with high-intensity ground shaking, the characteristics of the built environment, and the geography and the human ecology combined with the damage and social disruption made the emergency response difficult. The extent of the damage to the main highways and the volume of the debris in the streets created major traffic congestion and blocked access for emergency and rescue vehicles [13]. Disruption of communication systems and IT infrastructure made search and rescue and emergency response challenging and water shortages due to the significant damage to the utility infrastructure impeded the relief and rehabilitation activities.

This study aims to (i) identify the challenges of response and recovery activities from ground zero in the aftermath of the 6<sup>th</sup> February Kahramanmaraş earthquake series, and accordingly (ii) propose a set of low-cost digital solutions to address the challenges related to response and recovery activities. In April 2023, a fact-finding mission was performed in Malatya, one of the most affected cities during the earthquake as shown in Figure 1. Hence, officials and staff from Balıkesir Metropolitan Municipality (BMM), which is a city from the Aegean coast of Türkiye, were allocated to Malatya for performing post-disaster response and recovery. The BMM team carried out post-disaster activities such as restoration of essential services and debris removal, but not emergency response actions such as search and rescue, thereby, challenges of emergency response were not captured in this

study. The fact-finding mission in Malatya took four days (between 12 to 15 April 2023) and included field observations and semi-structured interviews with four officials from the municipalities of Balıkesir and Malatya which are explained in Section 4. The challenges that BMM staff faced and the proposed digital solution to address these challenges are presented in Section 5. The conclusions are drawn, and recommendations are provided in Section 6.



Figure 2. AFAD emergency shelter camps in Malatya

## 2. Literature Review

A Disaster Management Framework (DMF) enables effective recovery support to disaster-impacted regions by providing a flexible structure that enables different agencies to operate in a unified and collaborative manner. Most DMFs usually have four key components that are defined as follows [14] :

1. *Prevention* is related to mitigation consisting of creating capabilities to reduce loss of life and property by lessening the impact of disasters.
2. *Preparedness* is developing knowledge and capacities to effectively anticipate, respond to and recover from the impacts of disasters. It can include early warning systems, contingency planning, stockpiling of equipment and supplies, and creating coordination mechanisms.
3. *Response* is disaster relief including actions taken during or immediately after a disaster to protect lives and property, reduce health impacts, ensure public safety, meet the basic subsistence needs of the people affected and control secondary earthquake hazards. Typically, it includes rapid damage assessment, search and rescue, emergency medical care, restoration of essential services, firefighting, communication, crisis decision-making, evacuation, protection of lives and property, provision of emergency shelters for the people affected, and debris removal.
4. *Recovery* aims to restore communities affected by a disaster. It involves not only reconstructing and restoring physical infrastructure damaged during an earthquake but also rebuilding the economic strength and social stability of a community, dealing with the disruption that the disaster caused and mitigating future hazards.

DMFs are often supported by national-level risk assessments that typically consider a broad range of earthquake impacts including water, transport and energy utility infrastructures alongside enabling services such as information and communication technology (ICT) to identify vulnerable locations and services. [15], [16] DMFs can also be employed for identifying suitable recovery strategies for restoring the infrastructure services in a prioritised manner [17] and to ensure their resilience to further disasters.[18]. Several studies have compared the DMFs of various countries such as Chile and Ecuador [19], Bucharest, Mexico and Turkey[20], Japan and India [21] and Indonesia [22]. For the task in hand, the development of disaster management in Türkiye can be divided into five periods [3][23] :

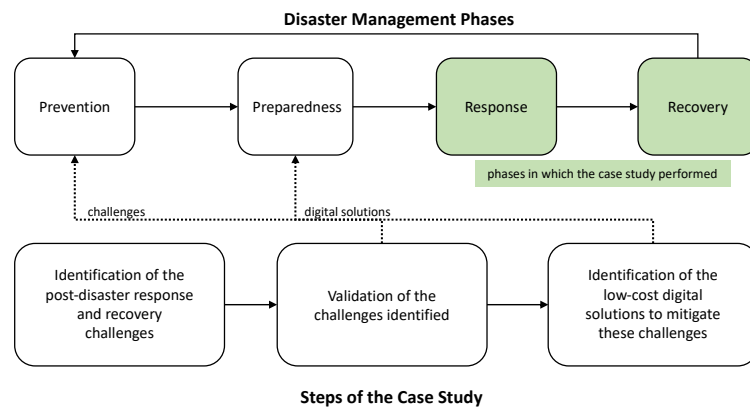
- 1923 to 1944 the focus was on immediate response,
- 1944 to 1958 the focus changed to disaster reduction,
- 1959 to 1999 saw the foundation of a dedicated ministry through law No.7269 on precautions to be taken due to disasters affecting public life and assistance to be provided,
- 1999 to 2009 was the turning point for disaster management and coordination in the aftermath of the 1999 Marmara Earthquake with regulations established on construction in disaster areas and buildings in earthquake-prone areas including materials regulation and fire prevention (2007),
- Post-2009 was the period when institutional roles were redefined and organised into AFAD as part of law No. 5902 passed in the Turkish Parliament; followed by the setting up of a disaster insurance law (2012) and an update to the 2007 construction regulations (2018) to use high-quality concrete reinforced with steel bars in earthquake-prone areas.

While national frameworks are often quite distinct, focussing on different aspects, it was reported that legal, policy, planning and organisational aspects form the key foundations for a systematic and coordinated response to disasters. The need for a structured DMF was arguably established by the United Nations (UN) World Conference on Natural Disaster Reduction in 1994, which came to be known as the Yokohama Strategy. This strategy highlighted the close links between risk, disaster reduction, sustainable development, environmental protection and poverty alleviation. A decade later, the Hyogo Framework [24] was introduced that focused on disaster response and recovery and was composed of three strategic goals, several guiding principles, five priorities for actions and considerations for implementation and follow-up. Succeeding this, the Sendai Framework [25] was developed as a multilateral framework focusing on disaster preparedness and prevention, including priorities dealing with governance to technical issues. It acts as an umbrella strategic framework that sets out recommendations for national and local-level efforts by understanding the disaster risk, enhancing disaster preparedness, strengthening disaster risk governance, and appraising investments in disaster risk reduction. Whilst these frameworks and strategies provide a basis for designing a structured response to earthquakes, there are several challenges at the ground zero that impede response and recovery. Communities are seldom able to cope with the emergency when a disaster occurs, almost immediately losing the ability to judge, respond, and adapt to the situation [26]. Information flow and cooperation between multiple agencies and personnel during the response can also be challenging. Other challenges include overcoming barriers to medical delivery and implementation [27], and the shortage of trained people and resources for rescue operations [28]. Finally, having proper information about building structures, escape routes, and indoor-outdoor connections is crucial for effective response strategies [29]. To this end, several Building Information Modelling (BIM) applications are developed to be used in different phases of earthquake disaster management. The BIM-GIS integrated applications combines the the micro-level internal structure of individual building simulation with the macroscopic landscape and layout of the entire urban area. For instance, BIM-based simulations and 3D spatial environmental demonstrations effectively simulate disaster scenarios for disaster forecasting and generate early warning in disaster prevention and mitigation; and BIM-GIS integrated risk management system helps positioning of the disaster and the corresponding 3D demonstration for disaster detection and warning and evacuation and rescue [30]. In post disaster recovery, BIM is used for post-earthquake building condition assessment that includes earthquake damage simulations and infrastructure reconstruction costs; for example FEMA P-58 that is a BIM-based framework used for performing post-disaster reconstruction/refurbishment expenditure estimation [31]. BIM-based augmented reality (AR) applications also assist in identifying key infrastructure and utility systems to prioritise resource allocation and restoration efforts to ensure the rapid recovery of essential services [32].

The adoption of low-cost digital solutions has accelerated by Small and Medium Enterprises (SMEs) in various industries such as manufacturing [33], construction [34] and logistics [35]. Studies in the literature highlighted that these solutions generated a significant improvement in operational efficiency [36] and digital transformation maturity of SMEs [37]. Digital solutions can significantly contribute to providing effective and rapid earthquake response and recovery. For instance, early warning systems like ShakeMaps and TriNet have been reported to be efficient [38]. They can be augmented with remote sensing technologies such as GIS and GPS, and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for rapid damage assessments, aiding in the distribution of relief materials and response teams to the affected areas [39], particularly for densely populated cities. Wireless communication links using satellites, two-way radios, the Internet of Things (IoT), big data and mobile technologies have been widely applied to support response and recovery operations [40] and often form the backbone for communication services due to their adaptability [41]. Telehealth services have shown promising results for delivering healthcare during disasters [42]. Moreover, social media has significantly coordinated response and recovery efforts during recent earthquakes [43]. However, there is a gap in the literature that shows how low-cost digital solutions can be used in disaster management and improve the efficiency of ground-zero activities. Additionally, the research gaps in DMFs persist in areas such as cross-sectoral collaboration, community engagement, and dynamic risk assessment. Traditional approaches often lack real-time data integration and communication. Digital solutions can bridge these gaps by enabling data-driven decision-making to resource allocations and enhancing early warning systems. To this end, this study frames the role of digital solutions in supporting post-earthquake response and recovery activities for improved coordination, communication, and information management.

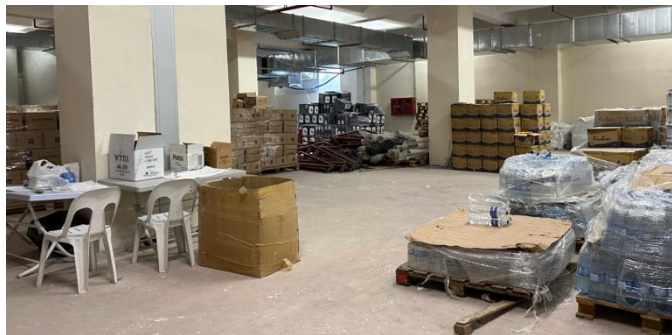
### **3. Fact-finding from Ground Zero after 6<sup>th</sup> February 2023, Kahramanmaraş Earthquake Series**

This study adopts case study research [44] to address two research objectives: 1) identify challenges that impede post-disaster response and recovery and 2) propose a set of digital solutions to address these challenges. To achieve these objectives, a fact-finding mission was conducted in Malatya to (see Figure 3): 1) identify challenges of response and recovery operations from ground zero, 2) validate the identified challenges, and 3) propose a set of digital solutions to address these challenges.



**Figure 3.** Disaster management phases and research steps

A response and recovery team from BMM was accommodated in a coordination centre in Malatya for 150 to 200 BMM staff with equipment, vehicles and inventory including food and water supplies for distribution to the affected (see Figure 4). A part of the team was replaced with newcomers every two weeks for reinforcement. A shopping mall in Balikesir was identified as the strategic point for people to drop off the relief materials that were transferred regularly to Malatya every alternative day. The team was responsible only for the post-earthquake response and recovery operations as presented in green in Figure 3 including receiving requests for relief materials, planning deliveries based on urgent needs and route optimisation, and carrying out daily deliveries. They were not responsible for emergency response actions such as search and rescue; hence, these emergency actions were not analysed in this study to identify their challenges.



**Figure 4.** BMM coordination centre's inventory in Malatya

For challenge identification, data was collected from two sources: 1) semi-structured interviews with four officials, including three officials from BMM and the General Secretary of Malatya Municipality and 2) field observations from ground zero in Malatya. Three BMM officials, who have different managerial roles and were responsible for different response and recovery operations in Malatya, and the General Secretary of Malatya Municipality (a high-level manager), were selected as interviewees, thereby ensuring the development of a comprehensive set of challenges (see Table 1 for details). The first interviewee, who is an architect in BMM, was working as the coordinator of a response and recovery team with 150 to 200 BMM staff and was responsible for coordinating daily and longer-term response and recovery operations in Malatya. The second interviewee is a health and social services expert who was working as the coordinator of rehabilitation to plan and support the performance of mental and social health services in Malatya. The third interviewee was the mayor of Balikesir who was responsible for arranging the logistics of the resources and relief materials between the two cities such as the logistics of the municipality staff and delivery of the necessary equipment (see Table 1). The last interviewee was the General Secretary of the Malatya Municipality who was responsible for local organisation and decision-making capacity though outside technical assistance i.e., external response and recovery teams coming from other city municipalities across Türkiye.

The interviews and field observations lasted four days i.e., between the dates of 12 to 15 April 2023 at ground zero in Malatya. In the first day of fact-finding mission (on 12<sup>th</sup> April), a quick trip across Malatya was completed with the coordinators of the team and the rehabilitation staff to understand the impact of the earthquake not only on the physical infrastructure but also the economic strength and social stability of the community in Malatya. Moreover, planning and coordinating the daily response and recovery operations were analysed in detail. Data was collected about receiving requests for relief materials, planning deliveries based on urgent needs and route optimisation and carrying out daily deliveries. In the second day (on 13<sup>th</sup> April), response and recovery activities planned for the long-term such as debris removal and inspection of damaged infrastructure were analysed, and

emergency shelter and container camps were visited to understand dealing with the disruption that earthquakes caused in community life and meeting the recovery-related needs of the people affected. In the third day (on 14<sup>th</sup> April), mayor of the Balıkesir was interviewed to understand the management of bringing outside technical support to Malatya. In the last day (on 15<sup>th</sup> April), the General Secretary of Malatya was interviewed for analysing post-earthquake local organisation and decision-making capacity while receiving external technical, financial and resource support. Moreover, review and validation of the challenges identified based on the interviews and observations conducted with BMM staff was completed. The list of digital solutions is generated through multiple expert validations (see Figure 3 and Table 1). Expert opinions were gathered from two academics who are experienced in digital transformation and disaster risk management two identify the digital solutions to address the post-earthquake response and recovery challenges identified from ground zero.

**Table 1.** Background of the participants and their contribution to the study

Case study steps participants involved in	Designation of the participant	Role of the participant at ground zero	Contribution of the participant in fact-finding
Identification of the challenges	Mayor of BMM	Head of response and recovery team in Malatya	- Identifying challenges related to managing response and recovery resources between two cities i.e., Balıkesir and Malatya (e.g., planning the logistics of the municipality staff and delivery of the necessary equipment)
	Architect and head of city history/aesthetics in BMM	Coordinator of the response and recovery team in Malatya	- Identifying challenges related to planning and coordinating the daily and long-term response and recovery operations (e.g., debris removal, inspection of damaged infrastructure, population displacement and temporary housing, delivery of relief materials)
	BMM staff in health and social services	Coordinator of the rehabilitation services in Malatya	- Identifying challenges related to planning and performance of mental and social health services at ground zero (e.g., organising special social activities to cope with trauma, setting up school and educational activities for the children affected)
Validation of the identified challenges	General Secretary of Malatya Municipality	Local coordinator of disaster management in Malatya	- Identifying challenges related to strengthening local organisation and decision-making capacity through coordination of the local and external resources. - Validation of the identified challenges
Identification of new digital solutions	Academic	Expert in digital transformation	- Identifying digital solutions to address these challenges
	Academic and consultant	Expert in disaster risk management and digitalisation	- Validation of the identified digital solutions based on the challenges

## 5. Post-earthquake Response and Recovery Challenges and Digital Solutions to address them

The challenges from ground zero (see Table 2) are associated with four response and recovery activities in which the BMM team was involved. These activities are:

1. *Planning* deals with establishing the policies and procedures for post-disaster recovery activities (e.g., allocating equipment and vehicles, provisions for emergency shelters and container camps, and trained personnel).
2. *Logistics and supply* are related to ensuring a well-organised supply service supported by resources, storage and transport facilities for post-disaster recovery.
3. *Communication and information management* deal with supporting other emergency response activities through essential communication equipment and information management protocols.

**Table 2.** Fact findings on response and recovery reported from ground zero

Activities	Challenges reported from observations and interviews
<b>Planning</b>	- Poor clarity in policies and procedures for emergency response that includes search and rescue, evacuation/migration, emergency relief and psychological support for the affected. - Infrequent updates to the action plan for response and relief. - Unavailability of equipment, vehicles and information to support search and rescue (e.g., lack of heat sensors for spotting people trapped under the rubbles, inaccurate imagery data/maps).



	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lack of a planned/standardized approach for rehabilitating the affected people (e.g., people were allowed to setup make-shift tents close to their damaged houses which were usually away from the designated area)</li> <li>- Loss in workforce due to the poor planning for the temporary accommodation (e.g., upon completion of the infrastructure of the tent camps, had to be disassembled and transferred to be reinstalled in container camps).</li> <li>- Lack of long-term planning for switching back to 'normal' life (e.g., debris removal, disassembly of temporary accommodations, initiatives to motivate stranded people to return back to Malatya, and funding for traders/businesses to resume their work).</li> </ul>
<b>Logistics and supply</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lack of local personnel to assist the external response team allocated to the city results in delays.</li> <li>- Not able to allocate the team quickly when an urgent request comes.</li> <li>- Poor visibility on the progress of ongoing response and relief activities.</li> <li>- Poor intersectoral coordination between different response and relief teams.</li> <li>- Poor visibility across the relief material supply chain to match demand with stocks in inventory (e.g., collecting order requests and relief materials in Balıkesir while storing and distributing in Malatya).</li> </ul>
<b>Communication and information management</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lack of structured communication protocol that results in ineffective resource allocation and duplication of tasks (i.e. currently no single contact point (e.g., personnel or centre) for receiving the requests from the ground zero).</li> <li>- Lack of an information management protocol (e.g., currently using WhatsApp for receiving requests, and exchanging information between the team members as a reactive communication measure).</li> <li>- Lack of essential communication equipment for information flow (e.g. radios and satellite phones).</li> <li>- Not able to understand where the urgent request coming from i.e., which part of the city.</li> <li>- Poor visibility on the incident area i.e., don't know where the response team/personnel is.</li> </ul>

To this end, 20 digital solutions are proposed in Table 3 based on the digital solutions identified from the literature [33]–[35] and the challenges captured from ground zero (see Table 2). The applicability of the set of digital solutions for response and recovery is validated by engaging with two relevant experts through a workshop. The first expert has experience in digital transformation, digital solution design and development and information systems. The second expert is working in disaster risk management and mitigation, and infrastructure resilience to shock events. Based on the expert opinions, the proposed set of digital solutions is deemed suitable for assisting the activities across four areas namely planning, logistics and supply, and communication and information management (see Table 3).

**Table 3.** Digital solutions to support post-disaster response and recovery

<b>Activities</b>	<b>Digital solutions</b>
<b>Planning</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Geocoded early warning and monitoring (e.g. ground vibration sensing, remote-sensing)</li> <li>2. Operations planning (e.g. emergency activities planning)</li> <li>3. Human resource planning (e.g. allocating/scheduling support teams, time/shift management)</li> <li>4. Digitised personnel training (e.g. standard operation procedures for search and rescue, evacuation/migration, emergency relief and psychological support)</li> <li>5. Change control (Document change control, Policy/Procedure change control)</li> <li>6. Digitised setup instructions (e.g. Work instructions, Guidelines, Setup instructions, Setup checklists, machine/vehicle setup support)</li> <li>7. Tool/Equipment selection assistance (e.g. selection guidelines, checklists)</li> <li>8. Layout planning (e.g. coordination centre planning, temporary accommodation design)</li> <li>9. Pre-completion support for handover (e.g. structural impact assessment, financial support schemes)</li> <li>10. Geocoded hazard mapping and disaster risk estimation</li> </ol>
<b>Logistics and supply</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>11. Geocoded prediction for recovery in disaster areas/zones based on parameters such as population, intensity of damage, demographic information, etc.</li> <li>12. Supply chain monitoring (e.g. supplier lead time monitoring, Supplier sustainability tracking, Supplier performance data capture, record keeping, reporting)</li> <li>13. Order tracking (e.g. order status tracking, order location tracking)</li> <li>14. Progress monitoring (e.g. emergency activity tracking, maintenance activity tracking)</li> <li>15. Disruption monitoring (e.g. supplier delay impact monitoring and analysis)</li> <li>16. Capacity monitoring (e.g. workload monitoring, uptime monitoring, availability assessment, bottleneck monitoring)</li> <li>17. Scheduling support (e.g. order prioritisation, scheduling for temporary accommodation)</li> </ol>
<b>Communication and information management</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>18. Inventory tracking (e.g. stock management, stock level monitoring)</li> <li>19. Tracking and assignment of tools/equipment (e.g. GPS-based equipment/vehicle tracking)</li> <li>20. Issue/query tracking (e.g. issue/query reporting, flagging of problems)</li> </ol>

## 6. Discussion and Conclusion

Earthquakes are events that have long-term impacts on the natural, economic, and social fabric of a nation. Countries have developed and adopted various disaster management frameworks to aid the prevention, mitigation, preparedness, response and recovery in the event of such disasters. This study captured the response and recovery challenges at ground zero in Malatya in the aftermath of Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence that happened on February 6, 2023.

Field observations and semi-structured interviews with the four officials from municipalities of Balıkesir and Malatya highlighted four hazard areas that impeded the response and recovery operations:

- 1) *Planning* related hazards include the absence of an institutional framework at the regional/local level, lack of a structured disaster response and recovery plan i.e. organisational structure, information, lack of an early warning system, etc.
- 2) *Logistics and supply* related deficiencies exist in shortage of resources i.e. financial, equipment, human, absence of standardised medical teams, inefficient resource allocation of existing resources, and
- 3) *Communication and information management* related challenges include lack of a central and single decision-making point at the scene which led to poor intersectoral coordination, ineffective communication i.e. challenges in communication protocols, lack of knowledge about Malatya and on-site experience in the city, etc.

The fact-finding mission including data collection via interviews with BMM's response and recovery team and observations from ground showed that outside technical, financial and resource support help strengthen local organizational and decision-making capacity. However, the challenges presented in Table 2 highlight disaster management's complexity and multifaceted nature, requiring comprehensive strategies and approaches to address them effectively. It is observed that there was a poor formal process for response and recovery, which needs to be clearly articulated and addressed through a comprehensive disaster management framework. The absence of such an institutional framework at the regional/local levels led to conflicts between the external teams that came from different 10+ municipalities to support ground zero activities in Malatya. Such a framework not only explicitly and individually describe local and central formal processes but also should capture the role of technology and digital solution as enablers to assist in response and recovery efforts. While the knowledge generated on the hazards is related to earthquake response and recovery, these can be applicable to any ground-zero scenarios of different disasters (e.g., floods, wildfires).

This study highlights the need for developing a systematic framework that sets the structure of response and recovery including procedures and descriptions, roles and responsibilities at the local and central authority levels. Such a framework has significant potential to eliminate the duplication of efforts and excessive usage of resources. The processes defined this framework need to be supported through a set of digital solutions which are low-cost, portable, sustainable, durable, etc. Implementation of these low-cost solutions in other industries showed a significant improvement in operational efficiencies such as timesaving, waste reduction etc. [36]. The set of 20 digital solutions scoped within this study (see Table 2) can operationalise the framework by supporting ground-zero activities and creating long-term value for disaster management. While this study scopes low-cost digital solutions for response and recovery, there are ongoing developments by AFAD for deploying radio systems to provide instant access to people affected, drone technologies in search and rescue, early warning systems engaging with gas, electricity and water suppliers, satellite technologies for disaster response, sensor and robotic-based digital solutions for disaster management and information systems for effective data exchange between stakeholders, and simulation and game-based training systems to support search and rescue operations [45].

## Acknowledgement

The author is grateful for the support provided by Balıkesir Metropolitan Municipality, particularly Mayor Yücel Yılmaz and the personnel who participated in the response and relief operations in Malatya.

## References

- [1] S. Mavroulis *et al.*, "Emergency response, intervention, and societal recovery in Greece and Turkey after the 30th October 2020, MW = 7.0, Samos (Aegean Sea) earthquake," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 14, pp. 7933–7955, Nov. 2022, doi: 10.1007/s10518-022-01317-y.
- [2] B. B. Erkan, A. N. Karanci, S. Kalaycıoğlu, A. T. Özden, I. Çalışkan, and G. Özakşehir, "From emergency response to recovery: Multiple impacts and lessons learned from the 2011 van earthquakes," *Earthquake Spectra*, vol. 31, no. 1, pp. 527–540, Feb. 2015, doi: 10.1193/060312EQS205M.
- [3] S. Platt and B. D. Drinkwater, "Post-earthquake decision making in Turkey: Studies of Van and İzmir," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 17, pp. 220–237, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.ijdr.2016.03.010.
- [4] The Federal Emergency Management Agency, "The Federal Disaster Response and Emergency Management," 2010.

- [5] S. Tanaka, "LOCAL DISASTER MANAGEMENT AND HAZARD MAPPING," 2008.
- [6] A. Greer, "Earthquake Preparedness and Response: Comparison of the United States and Japan," *ASCE*, 2012, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000179).
- [7] R. Havidan, Q. Enrico L., D. Russell R., and B. Neil R., *National planning and response: National systems*. 2007.
- [8] AFAD, "Ministry of Interior-Disaster and Emergency Management Presidency," 2023. <https://en.afad.gov.tr> (accessed Jun. 26, 2023).
- [9] Istanbul Technical University, "6 Şubat 2023 04.17Mw 7,8 Kahramanmaraş-Hatay ve 13.24 Mw 7,7 Kahramanmaraş Depremleri Ön İnceleme Raporu," 2023.
- [10] United States Geological Survey, "The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, Earthquake Sequence," 2023. <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html> (accessed Jun. 26, 2023).
- [11] K. Ö. Çetin, M. İlgaç, G. Can, and E. Çakır, "Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık M w =7.7 and Elbistan M w =7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes," 2023. Accessed: Sep. 07, 2023. [Online]. Available: [https://eerc.metu.edu.tr/en/system/files/documents/DMAM\\_Report\\_2023\\_Kahramanmaraş-Pazarcık\\_and\\_Elbistan\\_Earthquakes\\_Report\\_final\\_ENG.pdf](https://eerc.metu.edu.tr/en/system/files/documents/DMAM_Report_2023_Kahramanmaraş-Pazarcık_and_Elbistan_Earthquakes_Report_final_ENG.pdf)
- [12] World Bank Group, "Global Rapid Post-Disaster Damage Estimation (GRADE) Report- February 6, 2023 Türkiye/Kahramanmaraş Earthquakes," 2023.
- [13] Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, "TMMOB Ön Değerlendirme Raporu," 2023. <https://www.tmmob.org.tr/icerik/tmmob-degerlendirme-raporu-yayimlandi> (accessed Jun. 26, 2023).
- [14] J. R. Martin, "Session 11: Earthquake Disaster Response and Recovery Earthquake Hazard and Emergency Management Session No. 11 Course Title: Earthquake Hazard and Emergency Management Session Title: Earthquake Disaster Response and Recovery." [Online]. Available: <http://www.fema.gov/rrr/frp/>
- [15] P. Yariyan, H. Zabihi, I. D. Wolf, M. Karami, and S. Amiriyani, "Earthquake risk assessment using an integrated Fuzzy Analytic Hierarchy Process with Artificial Neural Networks based on GIS: A case study of Sanandaj in Iran," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 50, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101705.
- [16] R. J. Dawson *et al.*, "A systems framework for national assessment of climate risks to infrastructure," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 376, no. 2121, Jun. 2018, doi: 10.1098/rsta.2017.0298.
- [17] P. K. P. Liang, M. P. N. Burrow, M. Sasidharan, M. E. Torbaghan, and G. S. Ghataora, "A rational framework for post-flood road network condition recovery," *Infrastructure Asset Management*, vol. 10, no. 1, pp. 38–51, Aug. 2022, doi: 10.1680/jinam.21.00027.
- [18] The Association of Southeast Asian Nation, "ASEAN Comprehensive Recovery Framework," 2020.
- [19] S. Greiving *et al.*, "Multi-risk assessment and management—a comparative study of the current state of affairs in Chile and Ecuador," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–23, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13031366.
- [20] A.-M. Glod-Lendvai, "Comparative analysis of disaster risk management practices in Bucharest, Ciudad de Mexico and Istanbul," *GeoPatterns*, vol. 4, pp. 16–25, Aug. 2019, doi: 10.5719/GeoP.4/2.
- [21] P. Banerji, "Comparative Analysis of Disaster Management between Japan & India," *IOSR Journal of Business and Management*, vol. 13, no. 6, pp. 62–74, 2013, doi: 10.9790/487X-1366274.
- [22] T. Yustisia Lestari, R. Rachman, and A. Septhiany Prihatiningsih Syamsuddin, "Comparative Analysis of Disaster Management Between Indonesia and Japan from Regulatory and Institutional Aspects," *MATEC Web of Conferences*, vol. 331, p. 01007, 2020, doi: 10.1051/mateconf/202033101007.
- [23] A. Tolga Özden, "ARCHITECTURE AND DISASTER: A HOLISTIC AND RISK-BASED BUILDING INSPECTION PROFESSIONAL TRAINING MODEL FOR PRACTICING ARCHITECTS IN TURKEY A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN ARCHITECTURE," 2013.
- [24] International Strategy for Disaster Reduction, "Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters," 2007. [Online]. Available: [www.unisdr.org/hfa](http://www.unisdr.org/hfa)
- [25] Office for Disaster Risk Reduction, "Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030," 2015.
- [26] B. C. Lin and C. H. Lee, "Constructing an adaptability evaluation framework for community-based disaster management using an earthquake event," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 93, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijdr.2023.103774.
- [27] D. M. Levy, J. A. Kottler, J. W. Adams, J. R. Crawford, and M. L. Levy, "Using a Hybrid Approach to Increase the Impact of Medical Response to Natural Disasters," *Disaster Med Public Health Prep*, vol. 17, no. 1, Feb. 2023, doi: 10.1017/dmp.2022.263.
- [28] A. Warsame, K. Blanchet, and F. Checchi, "Towards systematic evaluation of epidemic responses during humanitarian crises: A scoping review of existing public health evaluation frameworks," *BMJ Glob Health*, vol. 5, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1136/bmjgh-2019-002109.

- [29] T. Ghawana, M. Aleksandrov, and S. Zlatanova, "3D geospatial indoor navigation for disaster risk reduction and response in urban environment," in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, Sep. 2018, pp. 49–57. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-4-49-2018.
- [30] M. J. Sani and A. A. Rahman, "GIS and BIM integration at data level: A review," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Oct. 2018, pp. 299–306. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-299-2018.
- [31] G. Charalambos, V. Dimitrios, and C. Symeon, "Damage Assessment, Cost Estimating, and Scheduling for Post-Earthquake Building Rehabilitation Using BIM," *Computing in Civil and Building Engineering*, 2014.
- [32] J. Um, J. min Park, S. yeon Park, and G. Yilmaz, "Low-cost mobile augmented reality service for building information modeling," *Autom Constr*, vol. 146, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104662.
- [33] B. Schönfuß, D. McFarlane, G. Hawkridge, L. Salter, N. Athanassopoulou, and L. de Silva, "A catalogue of digital solution areas for prioritising the needs of manufacturing SMEs," *Comput Ind*, vol. 133, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103532.
- [34] G. Yilmaz, L. Salter, D. McFarlane, and B. Schönfuß, "Low-cost (Shoestring) digital solution areas for enabling digitalisation in construction SMEs," *Comput Ind*, vol. 150, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.compind.2023.103941.
- [35] J. Macias-Aguayo, D. McFarlane, B. Schönfuß, and L. Salter, "A catalogue of digital solution areas for logistics SMEs," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 2022, pp. 1828–1833. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.664.
- [36] J. Macias-Aguayo, G. Yilmaz, A. Mukherjee, and D. McFarlane, "The Role of Low-Cost Digitalisation in Improving Operations Management," in *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, 2023.
- [37] G. Yilmaz, A. Mukherjee, J. M. Aguayo, and D. McFarlane, "Impact Assessment Model for Low Cost (Shoestring) Digitalisation in Small Construction Organizations," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2022. doi: 10.1088/1755-1315/1101/9/092043.
- [38] C. Chandrakumar, R. Prasanna, M. Stephens, and M. L. Tan, "Earthquake early warning systems based on low-cost ground motion sensors: A systematic literature review," *Frontiers in Sensors*, vol. 3, Nov. 2022, doi: 10.3389/fsens.2022.1020202.
- [39] A. Kamat, S. Shanker, and A. Barve, "Assessing the Factors Affecting Implementation of Unmanned Aerial Vehicles in Indian Humanitarian Logistics: A G-DANP Approach," *Journal of Modelling in Management*, pp. 416–456, 2023.
- [40] E. Yulianto, P. Utari, and I. A. Satyawan, "Communication technology support in disaster-prone areas: Case study of earthquake, tsunami and liquefaction in Palu, Indonesia," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 45, May 2020, doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101457.
- [41] A. Khan, S. Gupta, and S. K. Gupta, "Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 47. Elsevier Ltd, Aug. 01, 2020. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101642.
- [42] Z. Lokmic-Tomkins, D. Bhandari, C. Bain, A. Borda, T. C. Kariotis, and D. Reser, "Lessons Learned from Natural Disasters around Digital Health Technologies and Delivering Quality Healthcare," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 5. MDPI, Mar. 01, 2023. doi: 10.3390/ijerph20054542.
- [43] E. J. Sommerfeldt, "Disasters and Information Source Repertoires: Information Seeking and Information Sufficiency in Postearthquake Haiti," *Journal of Applied Communication Research*, vol. 43, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2015, doi: 10.1080/00909882.2014.982682.
- [44] R. K. Yin, *Case Study Research: Design and Methods*. SAGE Publications, 2003.
- [45] AFAD and MINISTRY OF INTERIOR DISASTER AND EMERGENCY MANAGEMENT PRESIDENCY, "Strategic Plan 2019-2023." [Online]. Available: [www.afad.gov.tr](http://www.afad.gov.tr)
- [46] NY Times, "Turkey Earthquake Damage." <https://www.nytimes.com/interactive/2023/02/06/world/turkey-earthquake-damage.html>

### 3 Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Issa Algoritması ile Pid Kontrolü

Ferdi AVCI\*<sup>1</sup>, Mehmet ÇAVAŞ<sup>2</sup>, 

\*<sup>1</sup> Muş Alparslan Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Makine ve Metal Teknolojileri, MUŞ  
<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği, ELAZIĞ

(Alınış / Received: 22.03.2023, Kabul / Accepted: 20.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

#### Anahtar Kelimeler

Kontrol,  
PID,  
Robotik,  
Simülasyon

**Öz:** Günümüzde, robotik sistem uygulamalarının hatasız çalışabilmesi için yapılan robot ya da robotik sistemlerin tasarımları öncelikle bilgisayar ortamında simüle edilerek test edilmektedir. Bu çalışmada 3 serbestlik derecesine sahip RRR (Dönel-Dönel-Dönel) robot kol tasarımı yapılarak, PID(Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolör ile kontrolü sağlanmıştır. PID parametreleri ISSA (Geliştirilmiş Salp Swam Algoritması) ve KKO (Karınca Kolonisi Optimizasyonu) algoritmasıyla optimum düzeyde belirlenmiş, PID kontrolörün performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, robotik sistemin mekanik tasarımında SolidWorks programı ve kontrol için Matlab programı kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada PID parametrelerinin tespiti ve uygulaması birim basamak ve sinüzoidal giriş için incelenmiştir. Robot kolun konum koordinatlarının belirlenmesi için ileri kinematik hesaplamalar yapılmış ve sonuç olarak robot kol başarılı bir şekilde tasarlanarak Matlab ortamında simüle edilmiştir. ISSA ile belirlenen katsayılar KKO algoritması ile belirlenen katsayılara göre, PID kontrolörün referans yörüngesi daha yakından takip ettiği görülmüştür.

### Pid Control of 3 dof Robot Arm with Issa Algorithm

#### Keywords

Control,  
PID,  
Robotik,  
Simulation

**Abstract:** Today, the designs of robots or robotic systems made for the error-free operation of robotic system applications can be tested by simulating in the computer environment. In this study, the RRR (Revolute-Revolute-Revolute) robot arm with 3 degrees of freedom was designed and controlled using a PID (Proportional-Integral-Derivative) controller. PID parameters were determined at the optimum level using ISSA (Improved Salp Swam Algorithm) and KKO (Ant Colony Optimization) algorithms, and it was aimed to compare the performances of the PID controller. In this context, the SolidWorks program was used in the mechanical design of the robotic system and the Matlab program was used for control. In addition, in this study, the determination and application of PID parameters are examined for unit step and sinusoidal input. To determine the position coordinates of the robot arm, advanced kinematic calculations were made and as a result, the robot arm was successfully designed and simulated in the Matlab environment. Coefficients determined by ISSA It has been observed that the PID controller follows the reference trajectory more closely than the coefficients determined by the KKO algorithm.

\*İlgili Yazar, email: f.avci@alparslan.edu.tr

#### 1. Giriş

Modern endüstri tesislerinde malzemelerin üretimi, taşınması, montajı, tıbbi tedaviler, uzay araştırmaları vb. birçok alanda farklı işlemlerin yapılmasında farklı tip ve model robot veya robotik sistemler kullanılmaktadır [1]. Robot kolu, eklemlerle birbirine bağlı uzuvlardan oluşmaktadır. Bu yapılar eğilmeyen, mukavemeti yüksek ancak genellikle hafif malzemelerden imal edilmektedir. Kütleli harekete geçirmek için moment kazandırmak,

durdurmaya çalışırken gereksiz güç harcanmasını engellemek, frenlemede salınımı azaltmak, çabuk ivmelenme gibi parametreler hafif malzemelerde daha iyi sonuçlar vermektedir. Aynı zamanda daha az enerji tüketimi ile kontrol imkânı sağlamaktadır [2].

Literatürde, robot kolların kontrolünün gerçekleştirildiği birçok çalışma bulunmaktadır [3-12]. Matlab programı kullanılarak 4 eksenli robot kolun kinematik hesapları çıkarılarak Matlab&Simulink ortamında ve gerçek modelde test edilen çalışmaların yapıldığı görülmektedir [3]. Üç serbestlik dereceli bir robotun uç işlevcisine PID kontrol ve bulanık mantık kontrolü kullanılarak değişken kuvvet uygulama suretiyle dayanıklılık testi yapılmış çalışmalar da mevcuttur [4]. Diğer bir çalışmada, 3-SD robotun tasarımı SolidWorks'te, simülasyonu Robotic Toolbox kullanarak Matlab&Simulink ortamında gerçekleştirilmiş, robotun kontrolü için gerekli olan kinematik ve dinamik denklemler elde edilerek simülasyon ve gerçek zamanlı çalışmaları yapılmıştır. Gerçek zamanlı uygulamalar için iç döngüde yer çekimi dengelemeli PID kontrolü, dış döngüde empedans kontrol algoritmasından yararlanılmıştır. Aynı zamanda yer çekimi dengelemeli PID kontrolün katsayıları, her bir uzuv için Matlab programının System Identification eklentisi kullanılmıştır [5]. Yüksek dereceli sistemlerin kontrolünde kullanılan Oransal-İntegral-Türev-İvme (Proportional-Integral-Derivative-Acceleration-PIDA) denetçi parametrelerinin Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) algoritması yardımıyla belirlenen ve PIDA denetleyicinin başarımını, literatürdeki Gradyant arama ve Genetik algoritma (GA) optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırılması da yapılmıştır [6]. 4 eksenli ve SCARA tipinde bir robot kol düzeneğinin görüntü işleme tabanlı yörünge kontrolüyle çapaklı parçaların temizlenmesi işlemi için yapılan çalışmada, öncelikle robot kola ait kinematik denklemlerin analitik çözümleri elde edilmiş, daha sonra bir kamera ile alınan görüntüler işlenerek, işlenecek parçanın sınırlarını belirlenmiştir. Piksel-koordinat dönüşümleri yapılarak bulunan değerler bilgisayar ortamında kontrol edilen motorlara açılış setleri şeklinde gönderilip, parça geometrisi olarak belirlenen yörünge izlenmesi sağlanmıştır [7].

Robot kol kontrollerinin yapıldığı çalışmalarda bir diğer yöntem ise simülasyon programlarının kullanılmasıdır. Simülasyon programlarında bulunan robot kolların konfigürasyonu tamamlandıktan sonra kontrol için gerekli olan kinematik ve dinamik denklemler elde edilerek simülasyon ve gerçek zamanlı çalışmalar yapılmıştır. Robot kolun yüklü ve yüksüz durumda izleyeceği yörünge planlanarak konumlar belirlenmiş ve belirlenen konumlara göre yörünge takibi yapılmıştır. Robot kolun kontrolünün sağlanması için simülasyon programı Matlab programı ile senkronize edilerek simülasyonu gerçekleştirilmiştir [8]. Ayrıca farklı optimizasyon algoritmaları kullanılarak PID parametreleri belirlenen, robot kolun kontrolü üzerine çalışmalar da yapılmıştır. Bir robot kolun konum kontrolü için PID kontrol parametreleri Genetik Algoritma (GA) ve Arı Algoritması (AA) kullanılarak belirlenen, optimizasyonu ve benzetim çalışmaları Matlab&Simulink ortamında yapılmış robot kolun, dinamik ve kinematik denklemleri elde edilerek matematiksel modelinin oluşturulduğu görülmektedir [9]. Diğer bir çalışmada, iki serbestlik derecesine sahip manipülatör için doğrusal olmayan kontrolörün tasarlandığı, Duruma Bağlı Riccati Denklemi (State Dependent Riccati Equation - SDRE) algoritmasının kullanıldığı çalışmaların da yapıldığı görülmektedir [10]. Bir başka çalışmaya bakıldığında ise, senkron motorlar tarafından hareket ettirilen iki eksenli bir robotun pozisyon kontrolü hem kesir dereceli PID (KDPID) kontrolör hem de iki serbestlik dereceli PID (2DOFPID) kontrolör kullanılarak yapılan çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmanın tasarım ve analizinin yapılması için Matlab/Simulink kullanılmıştır [11]. Son olarak, Farklı birçok alanda kullanılan birçok alanda kullanılan ve doğadaki yaratıklardan esinlenerek yapılan robot robot çalışmaları da bulunmaktadır. Bunlardan biri de farklı mekanizmalara sahip ve farklı işlevleri gerçekleştirebilen yılan robot çalışmalarıdır. Bunlar aktif ve pasif olmak üzere İki kategoriye ayrılır. Yapılan çalışmada ise ikinci kategorideki temel esas alınarak bir yılan robotun tasarımı ve kinematiki gerçekleştirilmiştir [12].

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, robot kol tasarımı için genel olarak SolidWorks programı, kontrol ve simülasyon için ise Matlab programının kullanıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalar da robot kolların özellikleri simülasyon programları aracılığı ile yapılmıştır. Kontrol kısmında ise PID kontrolörün parametreleri belirlenirken Genetik Algoritma, Arı Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması, Duruma Bağlı Riccati Denklemi Algoritması vb. farklı optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı görülmektedir.

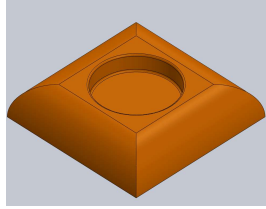
Son yıllarda, robot kollarının SolidWorks ile tasarımı ve Matlab programıyla kontrolünü sağlayan birçok çalışmanın yapıldığı, ancak bu çalışmalar da PID kontrolünde ISSA algoritmasının kullanılmadığı görülmektedir. Robot kolunun belirlenen hareketini daha hassas hale getirilmesini amaçlayan çalışmamızda, SolidWorks ile tasarlanmış ve Matlab programı yardımıyla ISSA algoritması kullanılarak tespit edilen PID katsayılarının kullanıldığı robot kol kontrolünün simülasyonu yapılmıştır. PID katsayılarının belirlenmesinde ISSA algoritması, ITSE performans indeksine göre kontrol edilerek çalıştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada tasarlanan robot kolun PID kontrolü, performans indekslerine göre de incelenmiştir. Farklı iki algoritma kullanarak incelenen sisteme, sinüs ve basamak girişleri uygulanarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Aynı zamanda daha önce robot kol kontrolü için parametrelerin belirlenmesi amacı ile hiç kullanılmayan ISSA algoritmasının robot kolu kontrolü üzerinde performansı belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 3 serbestlik dereceli robot kolun SolidWorks programıyla tasarımı yapılmış ve tasarlanan robot kol SimMechanics ile MATLAB ortamına alınarak modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturulan robot kolun her bir eklemine PID kontrolör eklenerek kontrol sağlanmıştır. PID kontrolörün optimum kontrol sağlaması için en uygun PID parametreleri ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) tespitinde ISSA ve KKO algoritmaları kullanılmıştır.

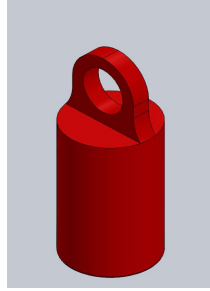
### 2.1. Robot kolunun mekanik tasarımı

3 serbestlik dereceli robot kolunun parçaları SolidWorks programı ile bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan robot kolun zeminini oluşturan platform Şekil 1'de verilmiştir.



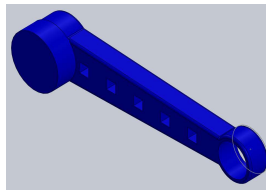
Şekil 1. Robot kolun platform çizimi

Şekil 1'de gösterilen Robot kolun üzerinde yer alacağı platform parçası 100x100x20 mm. boyutlarına sahip olup robot kolun birinci uzvunun yerleşebilmesi için 10 mm'lik silindirik oyuk açılmıştır. Şekil 2'de robot kolun X eksenindeki hareketinin sağlanacağı birinci uzvunun SolidWorks programındaki çizimi görülmektedir.



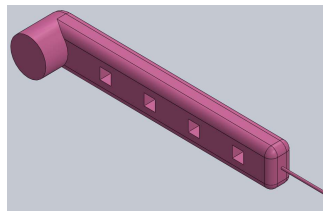
Şekil 2. Robot kolun 1. Uzvu

Şekil 2'de L uzunluğu yani birinci uzvu uzunluğu 100 mm olarak alınmış ve 100 mm'lik ölçü, zemin ile üstte bulunan ve ikinci uzvu merkezi ile çakışacak olan deliğin merkezine kadar olan boyutudur. Robot kolun Y eksenindeki hareketinin sağlanacağı ikinci uzvunun çizimi Şekil 3'de görülmektedir.



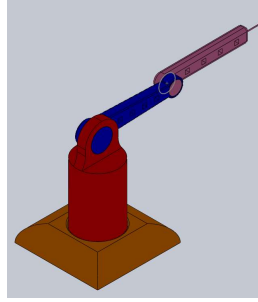
Şekil 3. Robot kolun 2. Uzvu

İkinci uzvunun L uzunluğu 100 mm olarak alınmış ve 100 mm'lik ölçü silindir ile ikinci uzvu merkezi ile çakışacak olan deliğin merkezine kadar olan boyutudur. Şekil 4'de robot kolun Y eksenindeki hareketinin sağlanacağı üçüncü uzvu ve gripper kısmı görülmektedir.



Şekil 4. Robot kolun 3. Uzvu

L boyu, yani üçüncü uzuv uzunluğu 120 mm olarak alınmış ve 120 mm'lik ölçü silindir merkezi ile end efektör olan üç kısım arasındaki boyutudur. Tasarımı yapılacak olan robot kolun her bir parçası çizildikten sonra montaj aşamasına geçilmiş ve gerekli olan montaj ilişkileri verilerek çizilen parçaların montajı yapılmıştır. Şekil 5'de tasarlanan 3 eklemlili RRR dizilimli robot kol düzeneğinin SolidWorks ' teki son görünümü görülmektedir.



Şekil 5. Robot kolun SolidWorks görüntüsü

Şekil 5'de görüldüğü gibi tasarlanan robot kolun montajı yapılarak home pozisyonunda konumlandırılmıştır. SolidWorks ortamında tasarımı ve montajı yapılan 3 serbestlik dereceli RRR robot kolun Matlab&Simulink ortamındaki modeli elde edilmiştir.

## 2.2. Kinematik Analiz

Kinematik analizleri eklem uzayından kartezyen uzaya (ileri kinematik) ya da kartezyen uzayından eklem uzayına (geri kinematik) geçişi sağlama için kullanırız.

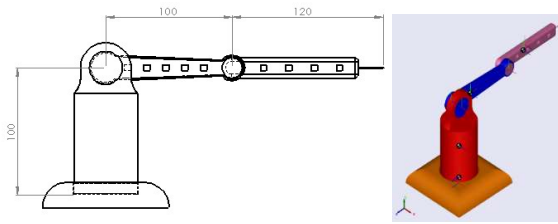
### 2.2.1. İleri kinematik

Tasarlanan 3 serbestlik derecesine sahip RRR robot kolunun ileri kinematik hesaplamalarının yapılabilmesi için DH tablosu oluşturulmuş ve tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Robot kolun DH tablosu

i	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
1	$\theta_1$	90	0	$L_1$
2	$\theta_2$	0	$L_2$	0
3	$\theta_3$	0	$L_3$	0

Şekil 6'da robot kolun 3 boyutlu görünümü ile ileri kinematik için gereken ölçülerin gösterildiği teknik resim çizimi verilmiştir.



Şekil 6. Eksen takımlı robot kol

Tasarlanan robot kolunun ileri kinematik hesabı için DH tablosu dikkate alınarak aşağıdaki her bir eklem için genel dönüşüm matrisi Denklem 1 ve 2'deki gibi tespit edilmiştir.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(rth1) & -\sin(rth1) & 0 & 0 \\ \sin(rth1) & \cos(rth1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(rth2) & -\sin(rth2) & 0 & L1 \\ \sin(rth2) & \cos(rth2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(rth3) & -\sin(rth3) & 0 & L2 \\ \sin(rth3) & \cos(rth3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$



Matrislerde kullanılan L1, L2 ve L3 değerleri robot kolun uzuvlarının uzunlukları olup rth1, rth2 ve rth3 değerleri ise açı değerlerinin radyan birimine çevrilmiş değerleridir. Uç işlevcinin konumu bulunmak için eklem matrisleri çarpımını gösteren ifade Denklem 3’de verilmiştir.

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (3)$$

İleri kinematik hesabı için kullanılan fonksiyon kodları Şekil 7’de verilmiştir. Kodlar yazılırken denklem 1,2 ve 3’den yararlanılmıştır. İleri kinematik hesabı, referans giriş değeri ile robot modelinin çıkışında yapılmıştır. Bu işlem için Matlab fonksiyonu bloğu kullanılmıştır. Her iki Matlab fonksiyonu bloğunda giriş değerleri derece cinsinden olup matlab fonksiyon bloklarında açılar önce radyan birimine çevrilmiştir. İleri kinematik hesabı yapılırken ilk eklemden başlayarak uç işlevciye kadar olan her bir eklem için rotasyon ve öteleme değerleri bulunan matrisler yazılmaktadır. Tasarlanan robot kolun ileri kinematik hesaplarının sonucunda koordinatlar bulunmuş ve her bir eklem için eklem matrisleri denklem 1 ve 2’ de verilmiştir.

```
function [Px,Py,Pz]= fcn(teta1,teta2,teta3)
l1=100;l2=100;l3=120;%uzunluklar

rth1=teta1*pi/180;rth2=teta2*pi/180;rth3=teta3*pi/180;%radyan donusumu

T_0_1=[cos(rth1) -sin(rth1) 0 0;sin(rth1) cos(rth1) 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
T_1_2=[cos(rth2) -sin(rth2) 0 l1;sin(rth2) cos(rth2) 0 0;0 0 1 0 :0 0 0 1];
T_2_3=[cos(rth3) -sin(rth3) 0 l2;sin(rth3) cos(rth3) 0 0;0 0 1 0 :0 0 0 1];
T_3_4=[1 0 0 l3;0 1 0 0;0 0 1 0 :0 0 0 1];

T_0_4=T_0_1*T_1_2*T_2_3*T_3_4;
Px=T_0_4(1,4);Py=T_0_4(2,4);Pz=T_0_4(3,4);
```

Şekil 7. İleri kinematik matlab kodları

Şekil 7’de verilen kodda; l ifadeleri uzuv uzunluklarını, rth ifadeleri açarın radyan karşılığını ifade etmektedir. Sonraki satırlarda dönüşüm matrisleri verilmiştir. Verilen matrislerin çarpımı alınarak transformasyon matrisi olan T\_0\_4 matrisi bulunmuştur. Bulunan matrisin dördüncü sütunundaki birinci satır X, ikinci satır Y ve üçüncü satır ise Z koordinatlarıdır.

### 2.2.2. Geri kinematik

Koordinat dönüşümünün sağlandığı bloğun giriş kısmına Eksen-Açıları, Euler Açıkları, Homojen transformasyon matrisi, Kuaterniyon, Döndürme Matrisi, Çeviri Vektörü değerleri girilebilir [13].

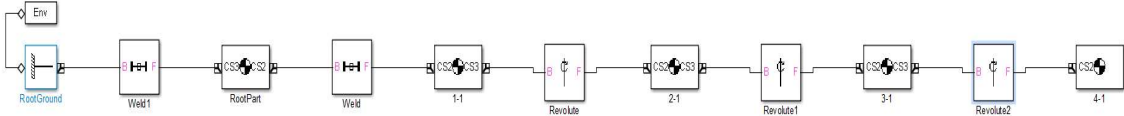
Ters Kinematik bloğu, tanımlanan robot modeline dayalı olarak arzu edilen bir uç efektör pozisyonu için eklem açılarını hesaplamak amacı ile kullanılan Matlab&Simulink bloğudur. Robot modeli, çözücünün uyguladığı tüm eklem kısıtlamalarını tanımlar [14].

Robotun gitmesi istenen koordinatları, robot modele açı olarak girilmesi için kartezyen uzayından eklem uzayına (geri kinematik) geçilmelidir. Bunun için geri kinematik hesabı yapmak amacı ile Matlab&Simulink’ de bulunan inverse kinematics bloğu kullanılmıştır. Ancak inverse kinematics bloğuna girişi, homojen transformasyon matrisi olarak girmek gerektiğinden verilen koordinatlar coordinate transformation conversion bloğuna verilerek homojen transformasyon matrisine dönüştürülmüştür.

Robot modelin end efektörünün gideceği konumunu, homojen transformasyon matrisi olarak, ağırlık değerlerini ve ilk konum tahmin değerleri bloğun girişine verilmiştir. Daha sonra bloğun özelliklerinden diğer parametreler düzenlenmiştir. Bunlara bağlı olarak config çıkışından ekleme verilecek açılar elde edilmiştir

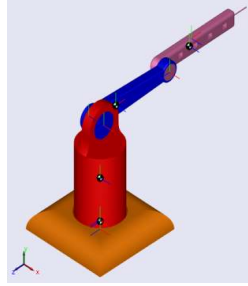
### 2.3. Sistemin Matlab&Simulink modeli

SolidWorks’de kullanılan Simmechanics eklentisi ile elde edilen robot kolun XML dosyasının Matlab&Simulink ortamında çalıştırılması için mech\_import('Montaj.xml') komut satırı kullanılmıştır. Şekil 8’de Matlab&Simulink ortamında oluşturulmuş olan robot kolun Matlab&Simulink modeli verilmiştir.



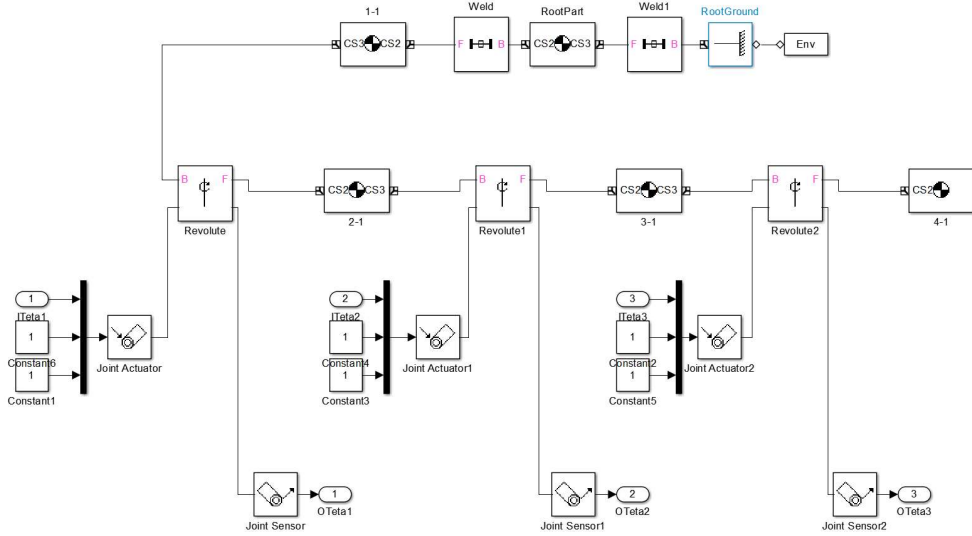
Şekil 8. Matlab&Simulink ortamında oluşturulmuş robot kolun modeli

Şekil 8’de görüldüğü üzere revolute, revolute1 ve revolute3 ismi ile belirtilen bloklar, tasarlanan robot kolun eklemlerini ifade etmektedir. Her eklem bloğunun başında bulunan 1-1, 2-1 ve 3-1 blokları kendilerine ait uzuvların özelliklerini taşımaktadır. Önceki bloklar ise sabit parçayı, yerçekimi ivmesi vb. özellikleri taşımaktadır. Çıkarılan modelin çalıştırılması sonucunda tasarlanan robot kolun Matlab&Simulink programındaki görünümü Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Robot kolun Matlab’deki görüntüsü

Robot kolun Matlab&Simulink ortamındaki modelinin her bir eklemine hareketi geçirecek bir aktüatör (joint actuator) ve eklem hareket açısını ölçen bir sensör (joint sensör) eklenmesi ile birlikte oluşturulan model Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 10. Simmechanics eklentisi ile Matlab&Simulink’e aktarılan robot modeli

Şekil 10’da görüldüğü üzere aktüatörü harekete geçirmek için açı, hız ve ivme değerleri girilmelidir. Bu değerlerin girişini mux (kodlayıcı) kullanarak sağlanmıştır. Açı değeri sinüs dalga kaynağından alınmış ve hız için 1, ivme için ise 1 sabit değeri verilmiştir. Sensörden okunan açı değeri ise derece birimindedir. Joint actuatorlerin, actuate with özelliği ile motion yapılmıştır. Revolute bloklarının her birinin dönme yaptığı eksen tanımlanmıştır.

### 2.3.1. ISSA ve KKO algoritmaları

Salps, fiçı biçimli Salpidae familyasından bir deniz organizmasıdır. Genellikle derin denizlerde yiyecek aramak için salp zinciri adı verilen bir sürü oluştururlar. Salp zinciri ön kısımda yer alan bir lider ve onu takip eden bir gruptan oluşmaktadır. Lider besin aramak için gruba kılavuzluk ederken takipçiler önlerindeki salpa göre konumlarını değiştirmektedir. SSA algoritması, Mirjalili ve arkadaşları tarafından bu sürülerin davranışlarının matematiksel olarak modellenmesi ile meydana getirilmiştir [15].

$n$  değişkenli bir optimizasyon problemi ve  $x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i]$  öğelerinin bir vektörü ile temsil edilen salp  $i$ 'nin konumu  $x^i$  göz önüne alındığında, salp zincirinin lideri Denklem 1'i kullanarak konumunu güncellemektedir.

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 \left( (ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right), c_3 > 0.5 \\ F_j - c_1 \left( (ub_j - lb_j)c_2 + lb_j \right), c_3 \leq 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

Denklem 4'de  $F_j$ , gıda kaynağı  $F$ 'nin (en iyi bilinen konum)  $j$ . boyutundaki değerdir,  $ub_j$  ve  $lb_j$ ,  $j$ . boyuttaki sırasıyla üst sınır ve alt sınırdır.  $c_2$  ve  $c_3$  parametreleri [0-1] aralıkta rastgele oluşturulmuş sayılardır.  $c_1$  değeri Denklem 5 kullanılarak hesaplanır.

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{T}\right)^2} \quad (5)$$

Denklem 5'de  $t$ , geçerli iterasyon ve  $T$ , toplam iterasyon sayısıdır. Liderin konumu güncellendiğinde, takipçiler de denklem 6'yı kullanarak konumlarını değiştirmektedir.

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-j}) \quad (6)$$

Denklem 6'da  $x_j^i, 2 \leq i \leq n$  ile salp  $i$ 'nin  $j$ . boyutundaki konumdur. Yinelemeli süreç, liderin konumunda daha yüksek rastgele değişikliklere izin veren ve arama uzayının keşfini vurgulayan  $c_1$  için yüksek değerlerle başlamaktadır. Arama aşaması, parametre katlanarak azalırken gerçekleşir ve liderin besin kaynağı çevresinde daha küçük ayarlamalar yapmasına izin vermektedir.

Algoritmanın tanıtılmasından sonra birçok araştırmacı daha iyi performans elde etmek üzere çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan biride Tudose ve diğerleri orijinal SSA'da, arama sürecindeki kötü bireyleri elimine eden ve yeni bireyler oluşturan ISSA'yı önermişlerdir. ISSA'nın orijinal salp swarm algoritması için önerdiği iyileştirmeler şöyledir;

- Arama uzayında salpların daha iyi dağılımını sağlamak için başlangıç popülasyonunun oluşturulmasında karşılıklı tabanlı bir öğrenme stratejisini içermektedir.

$$\tilde{x}_j^i = lb_j + ub_j - x_j^i \quad (7)$$

- Önerilen başlatma yöntemi, popülasyon boyutundan ( $N_{tot}$ ) daha büyük bir dizi başlangıç bireyinin ( $N_{init}$ ) seçilmesinden oluşmaktadır. Başlangıç bireylerinin yarısı ( $N_{init}/2$ ) geleneksel rastgele üretim yöntemiyle sağlanırken, popülasyonun geri kalanı denklem 6'ya göre zıt bireyler üretilerek tamamlanmaktadır. Son olarak, amaç fonksiyonu tüm ilk bireyler için değerlendirilmekte ve en iyi  $N_{tot}$  bireyleri ISSA'nın ilk yinelemesinde korunmaktadır.
- Sürünün keşif yeteneklerini artırmak için lider salpa benzer şekilde davranan "keşifçi salps" adı verilen yeni bir salp türü entegre edilmiştir. Denklem 5'e göre her takipçi salp bir öncekinden etkilenmekte ve bu durumda, bir performans sıralamasına göre önceki salps sıralaması ile daha iyi bir yakınsama oranı elde edilebilmektedir. En iyi birey lider salp olarak seçilmekte, takip eden  $N_{exp}$  keşifçi salp olarak ve kalan  $N_{fol}$  ise takipçi salp olarak kabul edilmektedir ( $N_{fol} = N_{tot} - 1 - N_{exp}$ ). Son olarak, son yinelemeler sırasında keşif sürecine daha iyi bir destek sağlamak için yinelemeler ilerledikçe, keşifçi salpların sayısı ( $N_{exp}$ ) doğrusal olarak artmaktadır.
- Üçüncü iyileştirme, Keşif salpları için ek bir konum güncelleme mekanizması olarak klasik bir çaprazlama operatörü eklenmekte, yinelemeli süreç sırasında artan bir olasılık ( $p_{CO}$ ) ile etkinleştirilmektedir. Çaprazlama operatörü, keşif salpı ve besin kaynağı arasında ağırlıklı ortalama olarak tek bir yavru üretmektedir. Ayrıca, aynı  $p_{CO}$  olasılığı ile yavrular üzerindeki gıda kaynağı etkisini artırmak için denklem 8 kullanılarak çaprazlama operatörü için ikinci bir varyasyon sunulmuştur. Denklem 8'de  $r_1$  ve  $r_2$  [0,1] aralığında rastgele oluşturulmuş sayılardır.

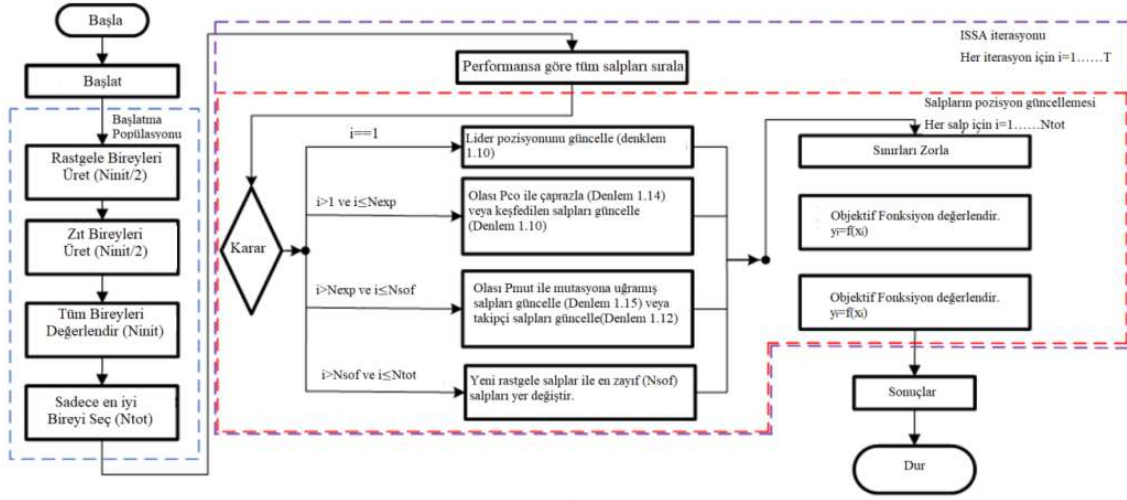
$$x_j^i = \begin{cases} F_j \cdot r_2 + x_j^i(1 - r_2), r_1 > 0.5 \\ F_j \cdot \left(1 - \frac{r_2}{2}\right) + x_j^i \cdot \frac{r_2}{2}, r_1 \leq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

- Yerel optimumda durgunluk riskini azaltmak için sadece mutasyon olasılığı olan takipçi salplara uygulanan bir mutasyon operatörü  $p_{mut}$  içermektedir. Mutasyona uğramış takipçi salp, rastgele seçilen

bir salpin konumunu kopyalamakta ve daha sonra bu konumun etrafında keşifçi bir salpa benzer şekilde davranmaktadır. Arama sürecine müdahale etmekten kaçınmak için, yinelemeler ilerledikçe mutasyon olasılığı doğrusal olarak azalmaktadır.

$$x_j^1 = \begin{cases} x_j + m_1 \left( (ub_j - lb_j)m_2 + lb_j \right), m_3 > 0.5 \\ x_j - m_1 \left( (ub_j - lb_j)m_2 + lb_j \right), m_3 \leq 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

Denklem 9'da  $m_1, m_2$  ve  $m_3$  [0-1] aralıkta rastgele oluşturulmuş sayılardır. ISSA, eliminasyon mekanizmasını en düşük performanslı  $N_{SOF}$  salp'lara da entegre etmektedir. Önerilen iyileştirmelerin entegrasyonu ile değiştirilmiş salp sürüsü algoritmasının akış şeması Şekil 11'de verilmiştir [16].



Şekil 11. ISSA akış diyagramı.

1992 yılında doktora tezinde karınca kolonisi algoritmasını (KKO) ilk olarak çalışan kişi Marco Dorigo'dur. Karıncaların belirli bir mantığa göre hareket ettiğini düşünen Dorigo, KKO'yu, gezgin satıcı problemi ve araç rotalama problemi gibi optimizasyon problemlerine uygulamıştır. 200 adet karınca kullanarak deney yapan Dorigo, çeşitli yiyecek ve engeller koyarak her bir karıncanın hareketini incelemiştir. Bu gözlemlerin sonucunda karıncaların en kısa yolu bulduklarını görmüştür [17].

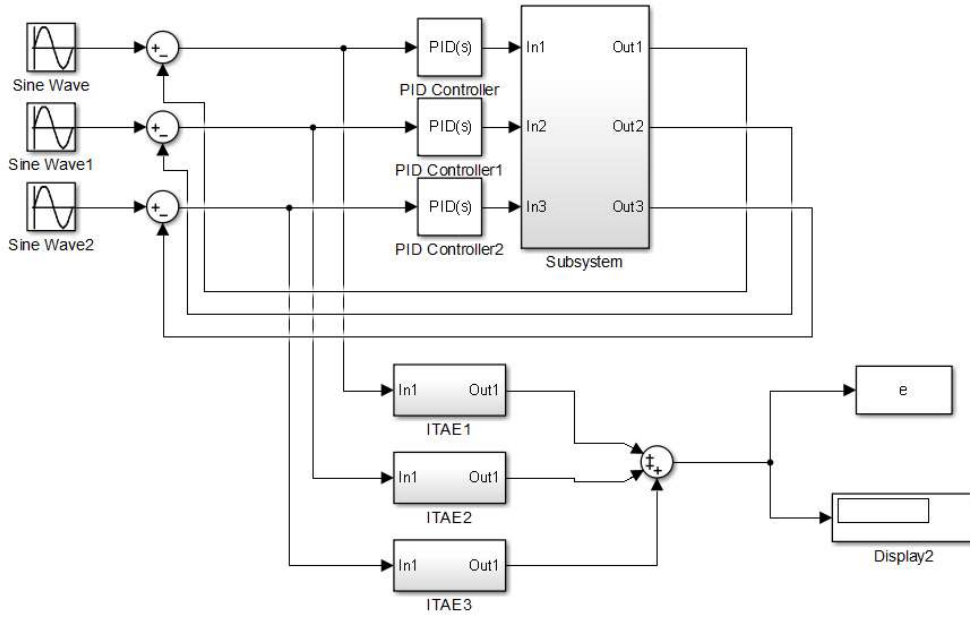
Salgıladıkları feromonlardan dolayı karıncalar her zaman kısa yolu seçmektedirler. Kimyasal bir salgı olan feromoni, bazı hayvanlar kendi cinslerinden başka hayvanları etkilemek için kullanırlar. Karıncalar ilerlerken, belirli bir miktar feromon depo ederler. Olasılığa dayanan bir yöntemle feromonun daha çok olduğu yolu tercih ettikleri görülmüştür. Depoladıkları feromonları, gıdaya giderken seçtikleri yola bırakarak, kendilerinden sonraki karıncalara yol seçiminde yardımcı olurlar. Bu içgüdüsel davranış, onların gıdaya giden en kısa yolu bulmalarını sağlamaktadır [17]. KKO'nun araç rotalama problemi çözümü için uygulama adımları aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

1. Rastgele seçilen şehirlerden "m" karınca serbest bırakılmaktadır.
2. Tanımlanan parametreye göre karınca gezginci veya takipçi olabilmektedir.
3. Her bir karınca gideceği şehri seçerken feromon miktarı ve şehirlerarası mesafeye göre seçmektedir.
4. Her bir kenardaki feromon miktarları güncellenmektedir.
5. Bütün şehirler gezilene kadar 2. ve 3. aşama tekrar edilmektedir.
6. Bütün karıncalar turu tamamladığında en çok feromon içeren kenarlar bu turdaki en iyi sonucu oluşturmaktadır.
7. Karıncaların hafızaları silinmektedir.
8. Durma kriteri sağlanınca durmakta yoksa adımlar tekrarlanmaktadır.

Genel olarak kontrol tasarımında dikkate alınan dört tür performans indeksi bulunmaktadır. Bunlar, mutlak hatanın integrali (IAE), karesel hatanın integrali (ISE), zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE) ve zamanla çarpılan mutlak hatanın (ITAE) integralidir [18]. Şekil 2'de IAE performans indeksinin Matlab&Simulink modeli verilmiştir. Gösterilen model her bir PID kontrolü için yapıлып, bulunan değerler toplanmıştır. Sistemin IAE performans indeksine göre performansı belirlenmiştir.

Şekil 12'de görüldüğü üzere girişlere referans sinyali olarak sinüs sinyali uygulanmıştır. Robot modelinin olduğu subsystem'in çıkışı PID kontrolör için geri besleme olarak alınmıştır. Bu iki değer arasındaki fark ise PID

kontrolöre verilmiştir. ISSA ve KKO algoritması ile PID katsayılarının tespiti için Matlab&Simulink ortamında oluşturulmuş model Şekil 12’de görülmektedir.



Şekil 12. PID katsayılarının tespiti için hazırlanan Matlab&Simulink modeli

Şekil 12’de sinüs girişi için ISSA ve KKO algoritması tarafından PID parametrelerinin tespiti için ITAE performans indeksine göre hata değeri alınmıştır. Bu hata değeri algoritma kodu tarafından kullanılmış ve birim basamak girişi için, giriş sinyalleri değiştirilmiştir.

ISSA ve KKO algoritması ile PID katsayılarının tespiti için her bir PID kontrol bloğunun katsayılarına Tablo 2’ de verilen değişkenler sırasıyla ISSA için ayrı bir değişken tanımlanıp çalıştırılmıştır. KKO algoritması için ise ayrı değişkenler tanımlanarak algoritmalar çalıştırılmıştır.

Tablo 2. PID katsayılarının belirlenmesi için verilen değişkenler

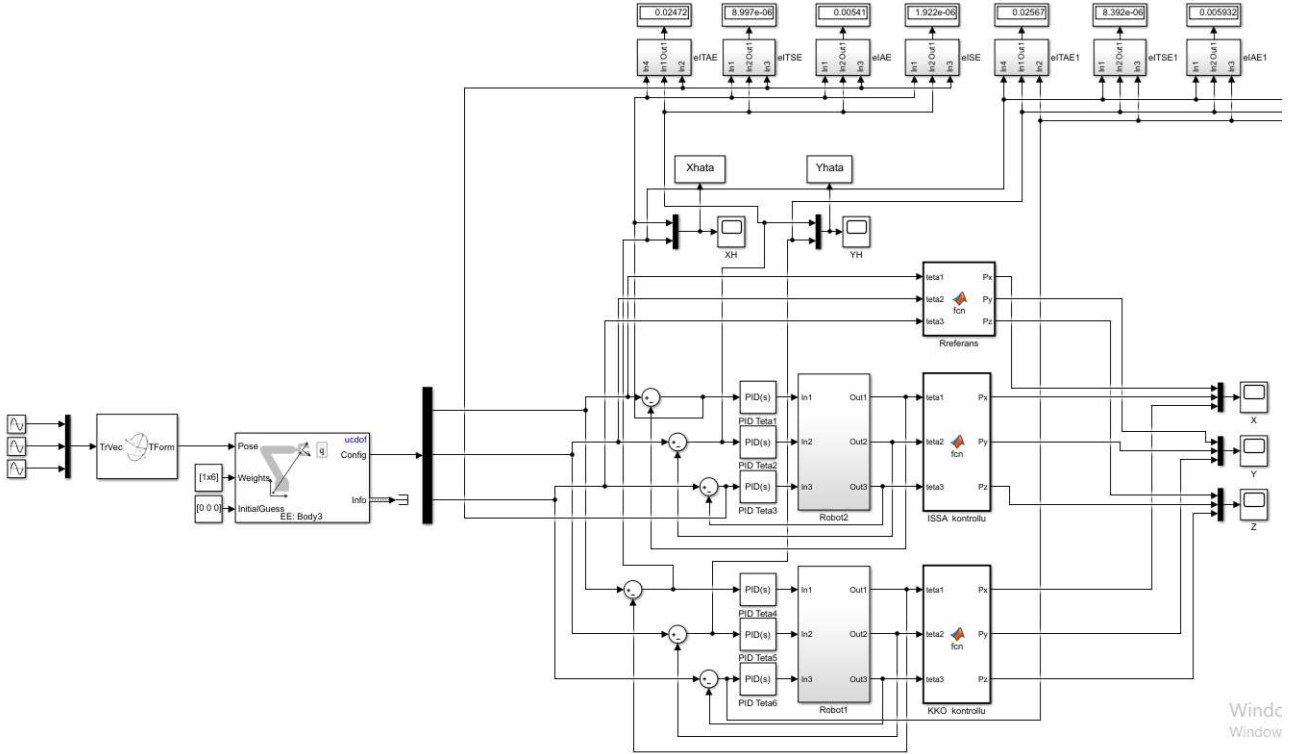
	ISSA			KKO		
	PIDTeta1	PIDTeta2	PIDTeta3	PIDTeta4	PIDTeta5	PIDTeta6
Kp	kp1	kp2	kp3	kkp1	kkp2	kkp3
Ki	ki1	ki2	ki3	kki1	kki2	kki3
Kd	kd1	kd2	kd3	kkd1	kkd2	kkd3

ISSA çalıştırdıktan sonra elde edilen PID parametreleri olan kp, kd, ki değerleri tespit edilmiş ve elde edilen Kp, ki ve kd değerleri Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. Hesaplanan PID parametreler

ISSA ’daki Kontrolör Kazanç Katsayıları	ISSA		KKO ’daki Kontrolör Kazanç Katsayıları	KKO	
	SİNÜS	STEP		SİNÜS	STEP
Kp1	999.9995195	733.8538922	kkp1	959.5959596	363.6363636
Ki1	999.9686933	1000	kki1	585.8585859	878.7878788
Kd1	39.3753549	147.8304805	kkd1	838.3838384	0
Kp2	999.9991774	394.5620992	kkp2	707.0707071	292.9292929
Ki2	999.6168899	999.9996837	kki2	939.3939394	979.7979798
Kd2	7.2576213	41.53488073	kkd2	151.5151515	10.1010101
Kp3	999.9997807	333.979338	kkp3	979.7979798	282.8282828
Ki3	22.42295676	1000	kki3	40.4040404	949.4949495
Kd3	998.9932794	29.89633793	kkd3	838.3838384	30.3030303

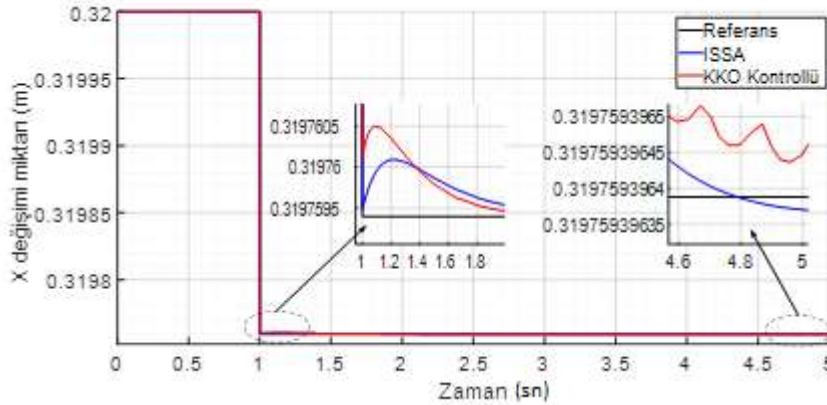
Tablo 3’de verilen PID katsayıları, PID katsayı değişkenlerine atanmış ve ISSA, KKO algoritması ile tespit edilen parametrelere sahip PID kontrolörlü robot kolun çalışma performansının izlenmesi için oluşturulan model Şekil 13’de verilmiştir. Sinüs girişi ya da birim basamak girişi için sistemdeki PID katsayıları optimizasyondaki bulunan katsayılara göre değiştirilerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 13’ de görüldüğü üzere performans indekslerinin tespiti için subsystem blokları tasarlanarak modele eklenmiştir. Modele, ileri kinematik fonksiyon bloğu ve PID kontrolörler eklenmiştir.



Şekil 13. KKO ve ISSA algoritmalarıyla PID kontrollü çalışma performansının izlenmesi için oluşturulan model

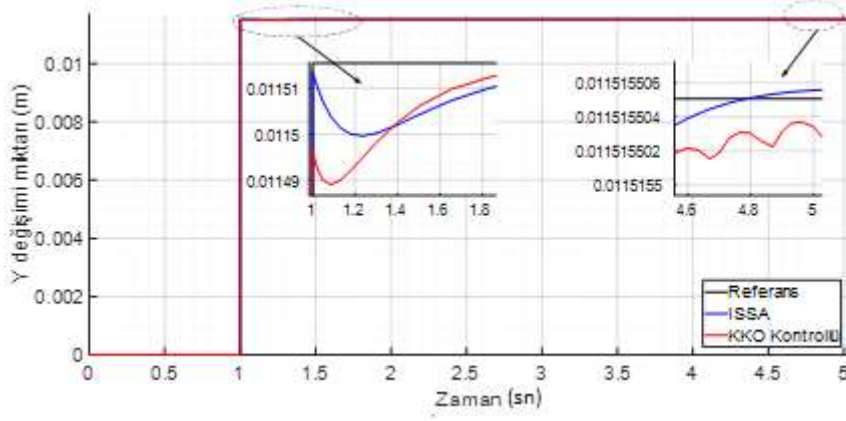
### 3. Bulgular

Yapılan çalışmada tasarlanan 3 serbestlik dereceli robot kolunun, ISSA ve KKO algoritması ile katsayıları tespit edilen PID kontrolör uygulanarak robot kolu uç efektörünün konum analizi yapılmıştır. Bu analizler için birim basamak ve sinüs girişi kullanılarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Her bir giriş için kontrolörün katsayıları iki algoritma ile optimize edilmiş ve birim basamak girişi için Şekil 14’de X, Şekil 15’de Y ve Şekil 16’da Z koordinatlarının değişim grafikleri verilmiştir. ISSA ve KKO algoritması ile elde edilen katsayıları kullanarak yapılan PID kontrolörün X eksenindeki değişimi ile referans yörünge Şekil 14’de verilmiştir.



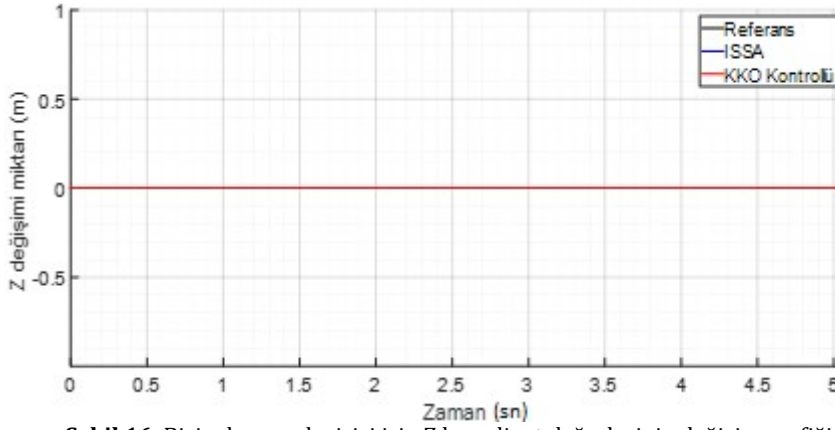
Şekil 14. Birim basamak girişi için X koordinat değerlerinin değişim grafiği

Robot kola birim basamak girişi uygulandığında, X eksenini için ISSA'nın, referans yörüngesini daha yakın izlediği Şekil 14’de görülmektedir. ISSA ve KKO algoritması ile elde edilen katsayıları kullanarak yapılan PID kontrolörün Y eksenindeki değişimi ile referans yörünge Şekil 15’de verilmiştir.



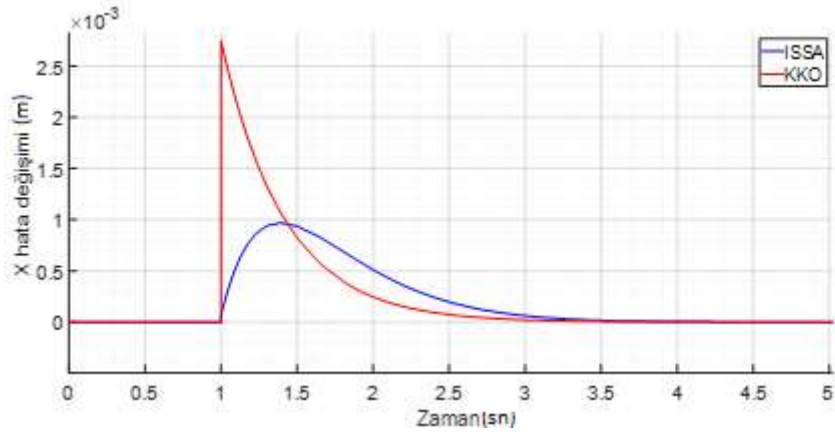
Şekil 15. Birim basamak girişi için Y koordinat değerlerinin değişim grafiği

Robot kola birim basamak girişi uygulandığında, Y eksenini için ISSA 'nın referans yörüngesini daha yakın izlediği Şekilde 15'de görülmektedir.



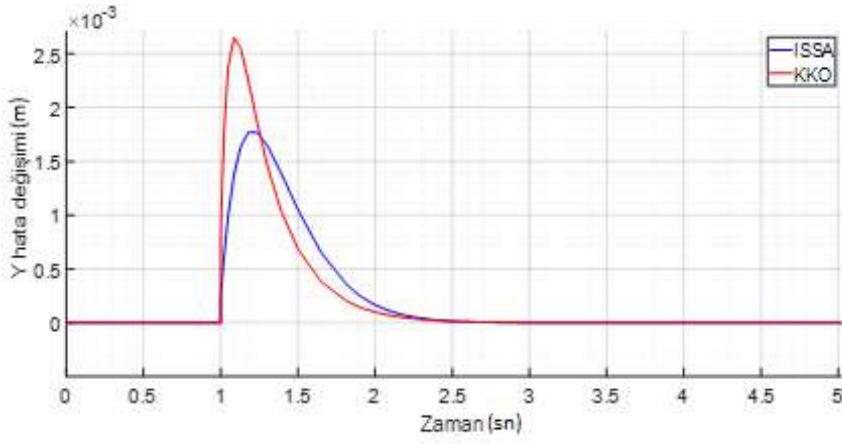
Şekil 16. Birim basamak girişi için Z koordinat değerlerinin değişim grafiği

Şekil 16'da görüldüğü üzere birim basamak olan referans sinyali iki boyutlu olduğundan Z ekseninde herhangi bir değişim olmamış ve bundan dolayı Z hata sinyali incelenmemiştir. Birim basamak girişi için, X eksenindeki kontrolörlerin hata sinyalleri Şekil 17'de verilmiştir.



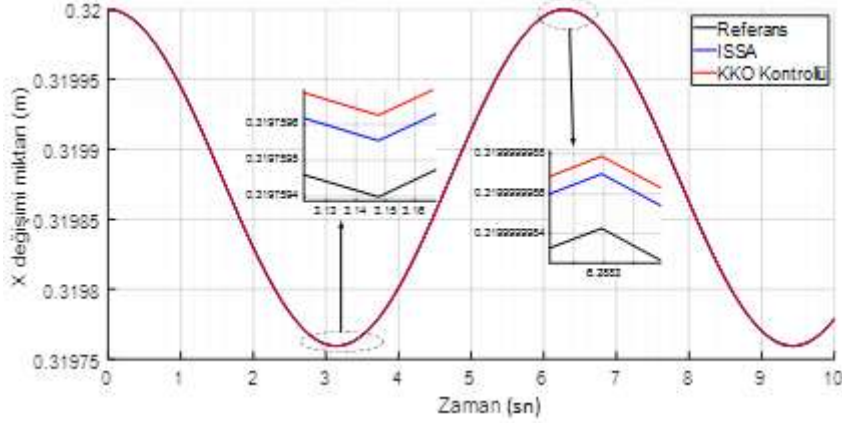
Şekil 17. Birim basamak için X eksenindeki hata grafiği

Robot kola birim basamak girişi uygulandığında, X eksenini için KKO algoritmasının hata sinyali salınımı ISSA'ya göre daha fazla olduğu Şekil 17'de görülmekte ve hata değerinin oturma süresi ise yaklaşık aynı olmaktadır. Birim basamak girişi için, Y eksenindeki kontrolörlerin hata sinyalleri Şekil 18'de verilmiştir.



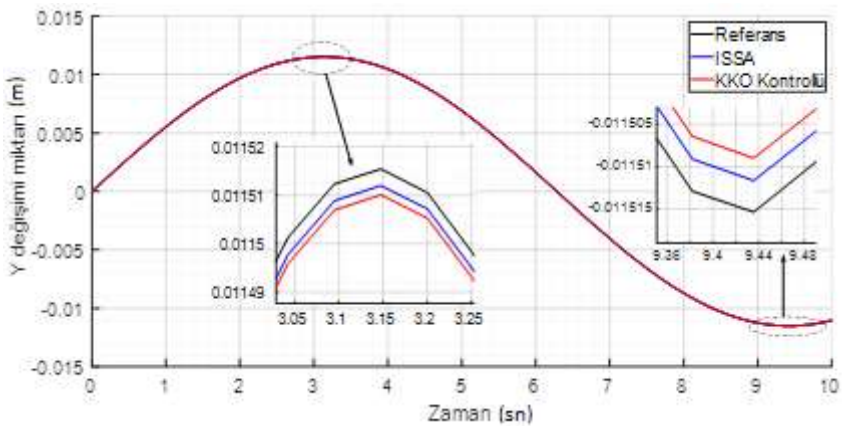
Şekil 18. Birim basamak sinyal girişinin Y eksenindeki hata grafiği

Robot kola birim basamak girişi uygulandığında, Y eksen için KKO algoritmasının hata sinyalinin salınımı ISSA'na göre daha fazla olduğu Şekil 18'de görülmekte ve hata değerinin oturma süresi ise her iki algortmada elde edilen katsayılar için yaklaşık aynı olmaktadır. Sinüs dalga girişi için Şekil 19' da X, Şekil 20' de Y, Şekil 21' de Z koordinatlarının değişim grafikleri verilmiştir. ISSA ve KKO algoritması ile elde edilen katsayıları kullanarak yapılan PID kontrol sonucu X koordinatındaki değişim ve referans yörünge Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 19. Sinüs sinyal girişi için X koordinat değerlerinin değişim grafiği

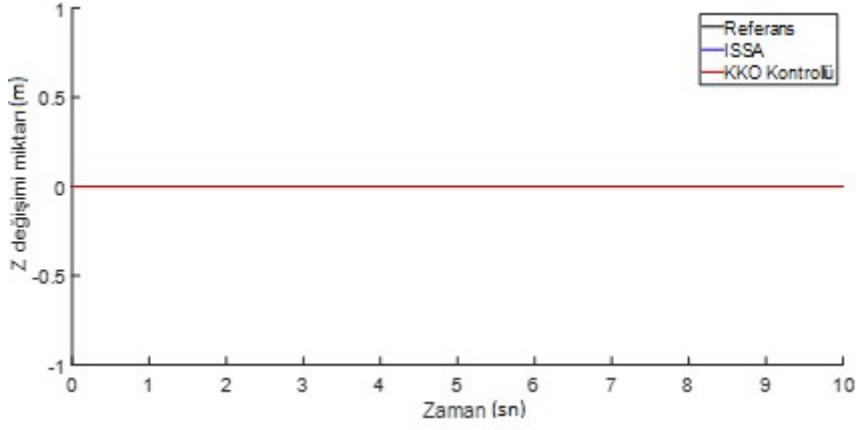
X koordinatı için ISSA ile katsayıları belirlenen kontrolün, referans yörüngesini daha yakın izlediği Şekil 19' da görülmektedir. ISSA ve KKO algoritması ile elde edilen katsayıları kullanarak yapılan PID kontrol sonucu Y koordinatındaki değişim ve referans yörünge Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Sinüs sinyal girişi için Y koordinat değerlerinin değişim grafiği

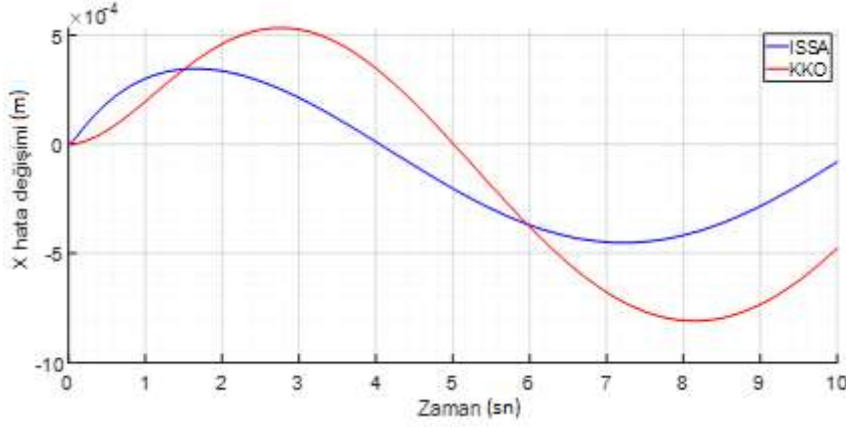
Y koordinatı için ISSA ile katsayıları belirlenen kontrolün, referans yörüngesini daha yakın izlediği Şekil 20'de görülmektedir.





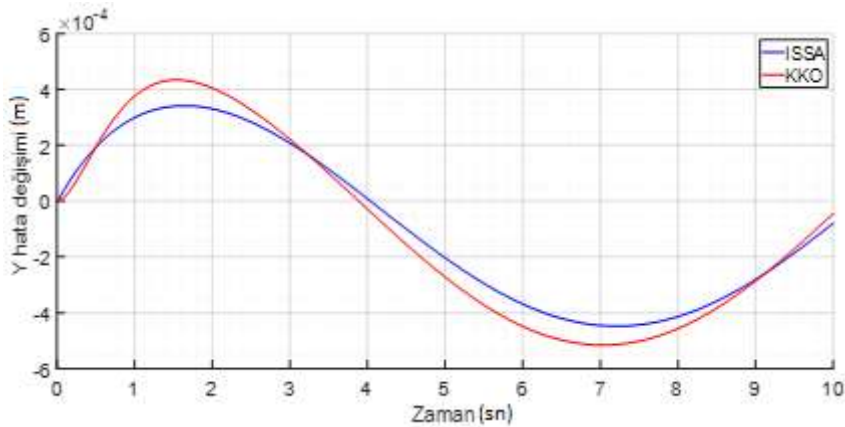
Şekil 21. Sinüs sinyal girişi için Z koordinat değerlerinin değişim grafiği

Şekil 21'de görüldüğü gibi Z koordinatında herhangi bir değişim olmadığından Z hata sinyali incelenmemiş ve şekil 22'de X hata sinyali, şekil 23'de ise Y hata sinyalinin değişim grafikleri verilmiştir. X koordinatının kontrolünde kullanılan kontrolörlerin hata sinyalleri Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Sinüs sinyal girişi için X eksenindeki hata grafiği

X koordinatı için, katsayıları KKO algoritması ile belirlenen kontrolde tepe değerleri arasındaki fark ISSA ile yapılan kontrole göre daha fazla olduğu Şekil 22'de görülmektedir. Y eksenindeki kontrolörlerin hata sinyalleri Şekil 23'de verilmiştir.



Şekil 23. Sinüs sinyal girişi için Y eksenindeki hata grafiği

Y eksenini için KKO algoritması ile katsayıları belirlenen kontrolde tepe değerleri arasındaki fark ISSA ile yapılan kontrole göre daha fazla olduğu Şekil 23'de görülmektedir.

Her bir koordinattaki kazançlar ise ITAE, ITSE, IAE, ISE performans indeksleri açısından değerlendirilmiş ve PID kontrolörlü sistemin performans indeks değerleri Tablo 4' de verilmiştir.

**Tablo 4.** Performans indeksi değerleri

OPTİMİZASYON ALGORİTMASI	PERFORMANS İNDEKSİ	SİNÜS	BİRİM BASAMAK
ISSA	ITAE	0.06744	0.004468
	ITSE	3.73e-05	4.496e-06
	IAE	0.01293	0.003001
	ISE	7.016e-06	3.361e-06
KKO	ITAE	0.084	0.004354
	ITSE	5.941e-05	6.156e-06
	IAE	0.01576	0.003233
	ISE	1.076e-05	5.053e-06

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada SolidWorks kullanılarak 3 serbestlik derecesine sahip robot kol mekanik olarak tasarlanmış ve Matlab&Simulink modeli elde edilmiştir. Matlab&Simulink'te çağrılacak olan İleri kinematik hesapları Matlab'da fonksiyon olarak yazılarak PID kontrolör ile robot kola açı değerleri verilmiş ve pozisyon kontrolü sağlanmıştır. Simülasyonda ISSA ve KKO algoritması ile elde edilen katsayılar kullanılarak simülasyona sinüs ve birim basamak girişi verilerek çalıştırılmıştır. Farklı iki giriş için çalıştırılan simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde Şekil 13 ve Şekil 14'deki grafiklerde de görüldüğü gibi birim basamak girişi için elde edilen sonuçlarda, ISSA'nın, KKO algoritmasından daha yakın bir şekilde referans sinyalinin izlediği ve daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca PID kontrolör parametrelerinin ISSA ile optimum düzeyde ayarlanabildiği görülmektedir.

Şekil 18 ve Şekil 19'da verilen grafiklerde görüldüğü gibi sinüs dalga girişi için elde edilen sonuçta da, ISSA'nın, KKO algoritmasından daha yakın bir şekilde referans sinyalinin izlediği ve daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. ISSA ve KKO algoritması ile PID parametrelerinin belirlendiği simülasyon programının çalıştırılması sonucu elde edilen performans parametreleri Tablo 4'de verilmiştir. Performans parametrelerinin tespiti ise ITEA, ITSE, IAE ve ISE olarak alınmıştır.

Elde edilen veriler ve alınan sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı sayıda ekleme sahip robot kolları ve farklı boyutlardaki robotların PID kontrolörlerindeki Kp, Ki ve Kd katsayılarının tespiti için ISSA'nın kullanılabileceği ve tasarlanarak imal edilecek bir robot kola gerçek zamanlı olarak uygulanıp simülasyon değerleri ile gerçek zamanlı deney sonuçlarının karşılaştırılabileceğini göstermiştir. Ayrıca PID katsayılarını belirlemek için farklı ve daha fazla sayıda algoritmalar aynı robot kol için kullanılarak karşılaştırma yapılabileceği belirlenmiştir. Bu çalışma ile farklı sistemlerin PID kontrolörünün katsayıları belirlenirken, ISSA kullanılarak sistemde oluşan hataların minimize edilebileceği ve sistemin daha verimli çalışabileceği ve istenildiği takdirde yapılacak yeni eklemelerle geliştirilebileceği düşünülmektedir.

#### Kaynakça

- [1] He, X., Chen, Y. (2009). Haptic-Aided Robot Path Planning Based On Virtual Tele-Operation, Robot. Comput. Integr. Manuf., vol. 25, no. 4–5, pp. 792–803, doi: 10.1016/j.rcim.2008.12.002.
- [2] Aydos, M., Profile, S., Nalbant, A. D. (2015). PID Tabanlı Robot Kolu Kontrolü: Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben Metotlarının ODE45 Deneysel Çözümleme ile Karşılaştırılması, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321361822>.
- [3] Capkan, Y., Fidan, C. B. (2020). 4 Eksenli Robot Kolun Knematik Hesaplarının Gerçek Model Üzerinde Matlab ile Analz ve Test, HORA 2020 - 2nd Int. Congr. Human-Computer Interact. Optim. Robot. Appl. Proc., doi: 10.1109/HORA49412.2020.9152851.
- [4] Kayışlı, K., Uğur, M. (2017). 3 Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun Bulanık Mantık ve PID ile Kontrolü, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., vol. 5, no. 4, pp. 223–234, doi: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.339907
- [5] Beyhan, A. (2021). Üç Serbestlik Dereceli Robotik Kolun Kartezyen Uzayda Empedans Kontrolü, BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Donuk, K., Özbey, N., Inan, M., Yeroğlu, C., Hanbay, D. (2019). PIDA Denetçi Parametrelerinin PSO Algoritması ile Belirlenmesi, 2018 Int. Conf. Artif. Intell. Data Process. IDAP 2018.
- [7] Hamida, Y., Naser, E. L. (2018). Endüstriyel Amaçlı Robot Kol Tasarımı Ve Üretimi, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/79304>.

- [8] Ağralı, E., Çavaş, M. (2020). V-REP Robotik Simülör ile Robot Kol Simülasyonu, Fırat Univ. J. Eng. Sci., vol. 32, no. 2, pp. 435-444, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/fumbd/issue/56883/687730>.
- [9] Karakoyun, E., Çakan, A., Kalyoncu, M. (2022). İki Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun Konum Kontrolü için PID kontrol Parametrelerinin Arı Algoritması (AA) Kullanılarak Belirlenmesi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 24, no. 1, pp. 111-124, doi: 10.25092/baunfbed.885152.
- [10] Ergocmen, B., Tilki, U. . Two Degree of Freedom Manipulator Control by SDRE Algorithm Trajectory Following and Autolanding with Incremental Nonlinear Dynamic Inversion for NASA GTM Model for Single Engine Operations View Project Fault Tolerant Flight Control with Control Allocation and SDRE for NASA GTM design View project, Accessed: Dec. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/354366216>.
- [11] Abut, T., Soygüder, S., Alli H. (2012). Bir Yılsanı Robotun Tasarımı ve Kinematik Analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 18, no. 1, pp. 8-13.
- [12] Güven A.F. (2023). 2DOFPID ve Kesir Dereceli PID Kontrolör ile Ayarlanan Senkron Motorların Kontrolü Yardımıyla İki Eksenli Robot Kolu Pozisyonunun Ayarlanması, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, vol. 13, no. 2, pp. 625-638.
- [13] Mathworks Help Center. Inverse Kinematics. <https://www.mathworks.com/help/robotics/ref/inversekinematics.html> (Erişim Tarihi: 11.11.2023).
- [14] Mathworks Help Center. Coordinate Transformation Conversion. [https://www.mathworks.com/help/ros/ref/coordinateconversion.html?s\\_tid=srchtitle\\_support\\_results\\_2\\_Coordinate%20Transformation%20Conversion](https://www.mathworks.com/help/ros/ref/coordinateconversion.html?s_tid=srchtitle_support_results_2_Coordinate%20Transformation%20Conversion) (Erişim Tarihi: 11.11.2023).
- [15] Tudose, A. M., Picioroaga, I. I., Sidea, D. O., Bulac, C. (2021). Solving Single-And Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch Problems Using An İmproved Salp Swarm Algorithm, Energies, vol. 14, no. 5, p. 1222, doi: 10.3390/en14051222.
- [16] Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., Mirjalili, S. M. (2017). Salp Swarm Algorithm: A Bio-İnspired Optimizer For Engineering Design Problems, Adv. Eng. Softw., vol. 114, pp. 163-191, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.07.002.
- [17] Dikmen, H., Dikmen, H., Elbir, A., EKŞİ, Z., ÇELİK, F. (2014). Gezgin Satıcı Probleminin Karınca Kolonisi ve Genetik Algoritmalarla Eniyilemesi ve Karşılaştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 18, no. 1, pp. 8-13.
- [18] Barisal, A. K. (2015). Comparative Performance Analysis Of Teaching Learning Based Optimization For Automatic Load Frequency Control Of Multi-Source Power Systems, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 66, pp. 67-77, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.10.019.

## Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Aritmilerin Sınıflandırılması

Ahmet Turan ÖZDEMİR 

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 11.08.2023, Kabul / Accepted: 26.09.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Makine Öğrenmesi,  
Bagging Decision Tree,  
Random Forest,  
Extra Tree,  
Gradient Boosting,  
Support Vector Machine

**Öz:** Bu çalışmada elektrokardiyografi (EKG) kayıtlarından aritmi türlerini belirlemek amacıyla modern makine öğrenme algoritmalarının kullanılması incelenmiştir. Amacımız, EKG sinyallerinin daha etkin bir şekilde analiz edilmesiyle aritmi sınıflandırmasında daha üstün sonuçların elde edilmesidir. Çalışmada kullanılan EKG verileri, MIT PhysioNet veri tabanındaki 203, 208, 210 ve 213 numaralı hasta kayıtlarından seçilmiştir. Bu kayıtlar, V, F ve N aritmi türleri ile etiketlenmiştir. Bagging Decision Tree (BDT), Random Forest (RF), Extra Tree (ET), Gradient Boosting (GB) ve Support Vector Machine (SVM) makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan sınıflandırma işlemleri neticesinde en yüksek doğruluk %98,14 doğruluk ile ET algoritması kullanılarak başarılmıştır. Bununla birlikte ET sınıflandırıcısı 2,17 saniyede eğitilmiş ve 0,0269 saniyede cevap üretebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yeni makine öğrenme algoritmalarının EKG aritmi sınıflandırmasında klasik Yapay Sinir Ağları tabanlı sınıflandırıcılara göre daha etkili sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bu algoritmalar, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk, hassasiyet ve özgünlük değerleri sunmaktadır.

## Arrhythmia Classification using Machine Learning Algorithms

### Keywords

Machine Learnings,  
Bagging Decision Tree,  
Random Forest,  
Extra Tree,  
Gradient Boosting,  
Support Vector Machine

**Abstract:** In this study, the use of modern machine learning algorithms in order to determine the types of arrhythmias from electrocardiography (ECG) recordings was investigated. Our aim is to obtain superior results in arrhythmia classification by analyzing ECG signals more effectively. ECG data used in the study were selected from patient records 203, 208, 210 and 213 in the MIT PhysioNet database. These recordings are labeled with arrhythmia types V (Ventricular), F (Fusion), and N (Normal). As a result of classification processes made with Bagging Decision Tree (BDT), Random Forest (RF), Extra Tree (ET), Gradient Boosting (GB) and Support Vector Machine (SVM) machine learning algorithms, the ET algorithm has the highest accuracy with 98.14% accuracy. ET classifier was trained in 2.17 seconds and was able to produce a response in 0.0269 seconds. The results show that new machine learning algorithms can produce more effective results in ECG arrhythmia classification than classical Artificial Neural Network-based classifiers. These algorithms offer higher accuracy, sensitivity and specificity values compared to traditional methods.

\*İlgili Yazar, email: aturan@erciyes.edu.tr

## 1. Giriş

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, yetişkin nüfusta çeşitli organlarda işlev bozukluklarına yol açan temel etken olan kalp-damar hastalıkları, en önde gelen ölüm nedenlerinden biri olarak bilinmektedir. Dünya Sağlık Örgütü'nün raporlarına göre her yıl, kalp hastalıklarına bağlı nedenlerle hayatını kaybeden insan sayısı 17,1 milyonu bulmaktadır. Bu ölümlerin büyük bir kısmı, kalpte meydana gelen elektriksel anormallikler olarak adlandırılan aritmilere bağlıdır. Erken teşhis edilen tehlikeli kalp rahatsızlıkları, kalp hastalıklarının etkili bir şekilde tedavi edilmesi ve ani kalp ölümlerinin önlenmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle ElektroKardiyogram (EKG) sinyallerini değerlendirerek aritmileri tespit eden otomatik sınıflandırıcılar, erken teşhis sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

Aritmi, düzensiz, çok yavaş veya çok hızlı kalp atışları ile karakterize edilen bir durumdur. Bu durum, inme veya kalp krizi riskini artırabilen önemli bir sağlık sorunudur [1]. Elektrokardiyogram (EKG) sinyalleri, aritmi teşhisi için yaygın bir şekilde kullanılır çünkü kalp ritmindeki anormallikleri tespit etmedeki etkinlikleri kanıtlanmıştır [2].

Geçtiğimiz yirmi yıl boyunca, EKG işaretleri içerisindeki aritmileri tespit etmeye yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Özellikle yüksek tahmin yetenekleri ile öne çıkan Yapay Sinir Ağları (YSA), tıbbi tanı sistemlerinde en sık kullanılan yöntem olmuştur. YSA biyolojik sinir ağlarının yapısından esinlenilerek geliştirilmiş ve paralel mimarileri sayesinde hesaplamalara büyük hız kazandırmıştır [3,4].

Derin öğrenme teknikleri de EKG işaretlerinde yer alan aritmilerin sınıflandırılmasında etkili bir şekilde kullanılmıştır [5,6]. Bu teknikler EKG sinyallerinden otomatik olarak öznelik çıkarma yetenekleri sayesinde popülerlik kazanmıştır [7]. Derin öğrenme modelleri normal kalp atışları (N), prematüre ventriküler kontraksiyonlar (PVC), atriyal fibrilasyon ve ventriküler taşikardi gibi farklı aritmi tiplerini ayırtmak için kullanılmıştır [8]. Farklı aritmi türlerini sınıflandırmak için çeşitli derin öğrenme yaklaşımları önerilmiştir. Örneğin araştırmacılar farklı aritmi türlerine göre EKG sinyallerini sınıflandırmak için evrimsel sinir ağları (CNN) kullanmışlardır [8]. CNN'ler, geleneksel sınıflandırma yöntemleriyle birleştirilerek sınıflandırma doğruluğunu artırmak için başarılı bir şekilde kullanılmıştır [6]. Ayrıca, üretken rakip ağlar (GAN), veri artırma amacıyla aritmi sınıflandırmasında başarılı bir şekilde kullanılmıştır [6].

Aritmi sınıflandırmasının doğruluğunu artırmak için öznelik çıkarma, model birleştirme ve dikkat mekanizmaları gibi farklı teknikler kullanılmıştır [6]. Öznelik çıkarma yöntemleri, ilgili öznelikleri tanımlayarak sınıflandırma modellerinin doğruluğunu artırma amacıyla kullanılmıştır [4]. Model birleştirme teknikleri, farklı modellerin güçlerini birleştirerek genel sınıflandırma performansını artırmak için kullanılmıştır. Dikkat mekanizmaları ise global özelliklerin ilişkisini artırmak için kullanılmıştır [6].

Derin öğrenme tekniklerinin aritmi sınıflandırmasında iyi sonuçlar verdiği bilinmekle birlikte destek vektör makineleri (SVM) ve rastgele ormanlar (RF) gibi diğer makine öğrenme algoritmalarının da aynı amaçlar için sıklıkla kullanıldığı unutulmamalıdır. Bahse konu algoritmalar, öznelik seçimi stratejileri ve EKG verilerinin ön işleme tabi tutulması gibi uygulamaların tümü aritmi sınıflandırmada kullanılmıştır [9]. Sonuç olarak, derin öğrenme teknikleri özellikle EKG sinyallerindeki aritmilerin sınıflandırılmasında etkili olmuştur.

Bu çalışmada, MIT-BIH aritmi veri kümesi üzerinde gelişmiş makine öğrenme algoritmalarının, aritmi tiplerini sınıflandırmadaki etkinliği incelenmiştir. Bu araştırmalar, tıbbi teşhis süreçlerine yardımcı olmak için geliştirilen makine öğrenme tabanlı yöntemlerin başarımları hakkında bilgi vermekte ve pratik uygulamalarda kullanım ihtimalleri değerlendirilmektedir. Bu çalışma gelecekteki araştırmalar için de rehberlik sağlayarak aritmi sınıflandırma başarımlarını artırmak ve klinik uygulamalarda bu tür sınıflandırıcıları daha etkili bir şekilde kullanmak için zemin oluşturmaktadır.

## 2. Materyal ve Metod

Bu bölümün kapsamında, veri formasyonu ve ön işleme adımları ile birlikte gerçekleştirilen makine öğrenme algoritmalarının türleri ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Ayrıca geliştirilen sınıflandırma modellerinin performanslarının değerlendirmesi için kullanılan ölçütler ve metrikler de detaylı bir şekilde tartışılacaktır. Böylece araştırmanın genel yapısı ile birlikte içeriği hakkında daha kapsamlı bir anlayışa sahip olunabilecektir.

## 2.1. Veri Formasyonu

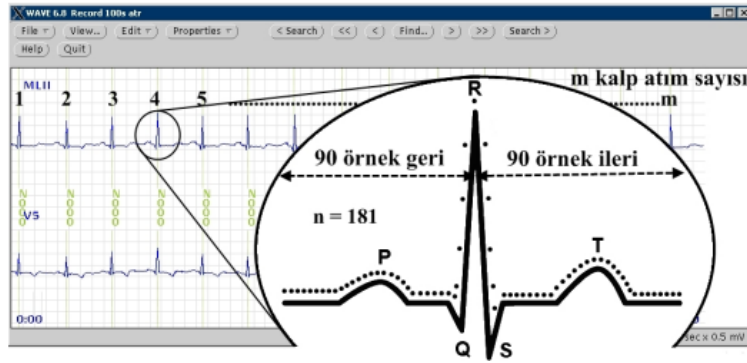
Bu araştırmada, MIT-BIH EKG veri tabanından elde edilen ve ham veri olarak adlandırılan 205, 208, 210 ve 213 numaralı hastaların kayıtları kullanılmıştır. Bu hastalara ait EKG kayıtlarının seçilmesinin amacı, normal (N), PVC (V) ve füzyon (F) tipi atımların üç sınıftan zengin bir şekilde bulunmasını sağlamaktır. Ham veri seti, 9.217 normal, 1.477 PVC ve 755 füzyon atımından oluşmaktadır (Tablo 1).

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan ham dosyaların aritmi içerikleri.

AAMI Sınıflandırması	N	V	F
MIT-BIH Aritmi Tipleri	N	PVC	F
Ham Veri Seti*	9.217	1.477	755
205	2.571	71	11
208	1.585	992	372
210	2.421	194	10
213	2.640	220	362

\*205, 208, 210 ve 213 numaralı hasta kayıtlardan oluşan ham veri setidir.

205, 208, 210 ve 213 numaralı kayıtlardan her bir kalp atımı, R dalgaları etrafında 90 örnek öncesi ve 90 örnek sonrasında olmak üzere toplam 181 örnekleme noktası kullanılarak örnekleştirilmiştir.  $m$ , kayıttaki kalp atım sayısını,  $n$  ise örnek sayısını temsil etmektedir. Bir kaydın süresi 30 dakika olduğu için  $m$  değeri sabit değildir, çünkü kalp atım sayısı kişiden kişiye değişebilmektedir. Bu çalışmada tüm kalp atımları 181 örnekleme noktasıyla temsil edilmekte olup,  $n$  sabit ve değeri 181'dir (Şekil 1).



**Şekil 1.** EKG işret işleme adımları ve izlenen yollar [3].

## 2.2. Veri Ön İşleme

Veri seti üzerinde standardizasyon işlemi, veri değerlerinin farklı özneliklerin birbirleriyle karşılaştırılabilir ve işlenebilir hale getirilmesi amacıyla kullanılan bir ön işleme adımdır. Bu adım, veri değerlerini ortalaması sıfır ve standart sapması bir olarak dönüştürerek veri setinin dağılımının standart hale gelmesini sağlar.

Standardizasyon, veri setindeki her bir özellik için aşağıdaki formül kullanılarak uygulanır:

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_x} \quad (1)$$

Burada:

- $Z$ , standartlaştırılmış değerdir.
- $X_i$ ,  $i$ . orijinal veri değeridir.
- $\bar{X}$ , özelliğin ortalamasıdır.
- $\sigma_x$ , özelliğin standart sapmasıdır.

Bu formül, her bir veri değerini, ortalamadan çıkararak verinin merkezlenmesini sağlar ve ardından standart sapmaya bölerek verinin ölçeğini dönüştürür. Sonuç olarak, veri setindeki her bir değişkenin standart bir dağılıma sahip olduğu ve aynı ölçekte olduğu veride standardizasyon elde edilir.

Standardizasyon, veri setinde yer alan büyük ölçekli değerlerin veya aykırı değerlerin sınıflandırma algoritması performansını olumsuz olarak etkilemesini önler. Aynı zamanda, çeşitli özelliklerin farklı ölçeğe sahip olması durumunda, bu farklılığın modele yanlılık veya büyük hatalar getirmesini engeller. Bu nedenle standardizasyon, veri seti üzerinde olası sınıflandırma veya tahmin hatalarını azaltır ve model performansını iyileştirir.

Bu çalışmada, MIT-BIH aritmi veri kümesi üzerinde standardizasyon yöntemi kullanılarak özellik değerlerinin standartlaştırıldığı bir ön işleme adımı gerçekleştirilmiştir. Bu adım, aritmi sınıflandırma algoritmalarının veri setine daha iyi uygulanabilmesini sağlayarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesine katkıda bulunmuştur.

### 2.3. Makine Öğrenme Algoritmaları

Bu çalışmada, MIT-BIH aritmi veri kümesinde yer alan çeşitli aritmi tiplerini doğru bir şekilde sınıflandırmak amacıyla Bagging Decision Tree Classifier (BDT), Random Forest Classifier (RF), Extra Tree Classifier (ET), Gradient Boosting Classifier (GB) ve Support Vector Machine (SVM) gibi beş farklı güçlü makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve performansları ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır.

#### 2.3.1. Bagging Decision Tree Classifier (BDT)

Bagging Decision Tree Classifier (BDT), bagging ve karar ağaçlarının prensiplerini birleştiren bir ensemble öğrenme algoritmasıdır. Bagging, eğitim verisinin farklı alt kümeleri üzerinde birden fazla model eğitme ve tahminlerini çoğunluk oylamasıyla birleştirme yöntemlerini içeren bir tekniktir. Karar ağaçları, girdi verisinin özelliklerine dayalı olarak bir dizi ikili kararın izlenmesi yoluyla tahminler yapan ağaç tabanlı modellerdir.

BDT'de, karar ağaçları eğitim verisinin farklı bootstrap örnekleri üzerinde eğitilir. Her bir ağaç bağımsız olarak eğitilir ve tüm ağaçların tahminleri çoğunluk oylamasıyla birleştirilerek final tahmini yapılır. BDT'deki rastgelelik, bootstrap örnekleri için veri örnekleme ve karar ağacının her bir düğümünde özelliklerin rastgele seçiminden gelir [10]. Bu rastgelelik, aşırı uyumlamayı azaltmaya ve modelin genelleme performansını artırmaya yardımcı olur.

#### 2.3.2. Random Forest Classifier (RF)

Random Forest Classifier (RF), BDT'ye yakın ilişkili bir diğer ensemble öğrenme algoritmasıdır. RF algoritması da karar ağaçlarını temel sınıflandırıcı olarak kullanır, ancak ek bir seviyede rastgelelik kullanır. RF'de her bir karar ağacı rastgele bir özellik alt kümesi üzerinde eğitilir, bu da ağaçlar arasında daha fazla çeşitlilik sağlar. Final tahmini, BDT'ye benzer şekilde tüm ağaçların tahminlerinin çoğunluk oylamasıyla birleştirilmesiyle yapılır [10]. RF'in yüksek boyutlu verilerle başa çıkmada etkili olduğu ve sınıflandırma görevlerinde yüksek doğruluk elde ettiği gösterilmiştir [10].

#### 2.3.3. Extra Tree Classifier (ET)

Extra Tree Classifier (ET), karar ağacı algoritmasının başka bir türevidir ve ek bir rastgelelik getirir. ET'de her bir özelliğin optimal ayırım noktasını bulmak yerine rastgele bir ayırım noktası seçilir. Bu rastgelelik, ağaçlar arasındaki çeşitliliği artırarak aşırı uyumlamayı azaltmaya yardımcı olur. ET'nin gürültülü ve yüksek boyutlu verilerle başa çıkmada etkili olduğu gösterilmiştir [11].

#### 2.3.4. Gradient Boosting Classifier (GB)

Gradient Boosting Classifier (GB), zayıf öğrencilerin genellikle karar ağaçlarının birleştirilmesiyle güçlü bir öğrenci oluşturmasını sağlayan bir boosting algoritmasıdır. BDT ve RF'dan farklı olarak, boosting temel sınıflandırıcıları ardışık olarak eğitir ve her bir sonraki sınıflandırıcı önceki sınıflandırıcılar tarafından yanlış sınıflandırılan örnekler üzerinde odaklanır. Bu tekrarlayan süreç, modelin genel performansını iyileştirmeye yardımcı olur. GB'nin dengesiz verilerle başa çıkmada etkili olduğu ve yüksek doğruluk verdiği bilinmektedir [10].

#### 2.3.5. Support Vector Machine (SVM)

Destek Vektör Makinesi (SVM), sınıflandırma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. SVM farklı sınıflara ait veri noktalarını maksimum marj ile ayıran optimal hiperdüzlemi bulur. SVM farklı çekirdek işlevlerini kullanarak hem doğrusal olarak ayrılabilir hem de doğrusal olmayan olarak ayrılabilen verilerle başa çıkabilir. SVM'in yüksek boyutlu verilerle başa çıkmada etkili olduğu ve sınıflandırma görevlerinde yüksek doğruluk elde ettiği gösterilmiştir [12].

Özetlemek gerekirse BDT, RF, ET, GB ve SVM sınıflandırma görevleri için kullanılan güçlü makine öğrenme algoritmalarıdır. BDT ve RF karar ağaçlarını temel sınıflandırıcı olarak kullanırken, BDT çoğunluk oylaması, RF ise rastgele özellik seçimi kullanır. ET ek bir rastgelelik getiren bir karar ağacı algoritması varyantıdır. GB zayıf öğrencileri birleştirerek güçlü bir öğrenci oluşturan bir boosting algoritmasıdır. SVM ise veri noktalarını ayıran optimal hiperdüzlemi bulan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritmalar geniş bir alanda incelenmiş ve çeşitli araştırmalarla etkinliği gösterilmiştir [10–12].

## 2.4. Performans Metrikleri

Çalışma kapsamında model eğitimini optimize etmek ve genelleme yeteneklerini değerlendirmek amacıyla k-katlamalı çapraz doğrulama tekniği kullanılmıştır. Bu yöntem, veri setini k alt küme halinde böler, ardından k kez model eğitimi ve testi gerçekleştirir. Her iterasyonda veri alt kümelerinden biri test verisi olarak ayrılırken diğer k-1 alt küme eğitim verisi olarak kullanılır. Bu yaklaşım sayesinde farklı veri alt kümeleri üzerinde model performansı değerlendirilir ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak daha güvenilir bir değerlendirme elde edilir [13-18]. Bu özel çalışmada k değeri 10 olarak belirlenmiştir. k-katlamalı çapraz doğrulama sonrasında elde edilen modeller, doğruluk oranı ve karmaşıklık matrisi gibi metrikler kullanılarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

**Doğruluk (Accuracy):** Sınıflandırma modellerinin doğru tahmin ettiği örneklerin, toplam tahmin sayısına oranını ifade eden bir ölçüdür. Basitçe söylemek gerekirse, doğru şekilde sınıflandırılan örneklerin toplam örnek sayısına oranını ifade eder. Ancak, dengesiz sınıf dağılımları durumunda doğruluk tek başına yeterli bir performans ölçütü olmayabilir.

$$Accuracy(Acc) = \frac{T_p + T_n}{T_p + T_n + F_p + F_n} \times 100 \quad (2)$$

**Karmaşıklık Matrisi (Confusion Matrix):** Bu matris sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir tablodur. Her satır gerçek sınıfları temsil ederken, her sütun tahmin edilen sınıfları temsil eder. Dört temel terimi içerir: Doğru Pozitifler (True Positives -  $T_p$ ), Yanlış Pozitifler (False Positives -  $F_p$ ), Doğru Negatifler (True Negatives -  $T_n$ ) ve Yanlış Negatifler (False Negatives -  $F_n$ ). Bu metrikler, modelinizin sınıfları ne kadar doğru veya yanlış tahmin ettiğini gösterir.

## 3. Bulgular

Bu çalışmada, elektrokardiyografi (EKG) kayıtlarındaki aritmi tiplerinin sınıflandırılması amacıyla çeşitli makine öğrenme algoritmalarının performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada incelenen sınıflar; normal atım (N), erken ventriküler kasılma (V), ve füzyon tipi atım (F) olarak belirlenmiştir. Farklı algoritmaların sınıflandırma yetenekleri doğruluk değerleri, kararlılık, eğitim ve test süreleri, ayrıca karmaşıklık matrisi analizleri temelinde değerlendirilmiştir. Bu bölümde, her bir algoritmanın performansının ayrıntılı bir şekilde incelenmesiyle elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Sonuçlar, aritmi sınıflandırma alanında hangi algoritmanın en iyi performansı sergilediği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır.

Makine öğrenme algoritmalarının performansını değerlendirmek amacıyla, analiz sonuçlarını içeren Tablo 2'ye göz atalım. Bu tablo, kullanılan algoritmaların performansını farklı ölçütlere göre özetlemektedir. Algoritmalar arasındaki karşılaştırmalar yapılarak, hangi algoritmanın daha iyi bir sınıflandırma yeteneği gösterdiği ve sınıf tahminlerinin dağılımını anlamamız kolaylaşır.

**Tablo 2.** Makine öğrenme algoritmalarının başarımlarını ve çalışma süreleri

Algoritma	Doğruluk	Standart Sapma	Eğitim Süresi (s)	Test Süresi (s)
<b>BDT</b>	0,9796	0,0038	9,22	0,0169
<b>ET</b>	0,9814	0,0047	2,17	0,0269
<b>RF</b>	0,9804	0,0035	7,24	0,0271
<b>GB</b>	0,9785	0,0038	95,58	0,0062
<b>SVM</b>	0,9783	0,0044	2,51	0,2653



BDT algoritması yüksek bir doğruluk değeri (0,9796) sergilemektedir. Standart sapmanın düşük olması (0,0038), algoritmanın sonuçlarının kararlı olduğunu göstermektedir. Eğitim süresi (9,22 saniye) biraz uzun olabilir, ancak test süresi oldukça hızlıdır (0,0169 saniye). Karışıklık matrisine bakıldığında (Tablo 3),

**Tablo 3.** BDT karışıklık matrisi.

	Tahmin N	Tahmin V	Tahmin F
Gerçek N	9174	11	32
Gerçek V	18	1423	36
Gerçek F	110	45	600

- N: Doğru tahmin oranı %99,53 ( $9217/9217 = 0,9953$ ). Bu oldukça yüksek bir başarı oranıdır.
- V: Doğru tahmin oranı %96,34 ( $1423/1477 = 0,9634$ ). Bu da genel olarak iyi bir sonuçtur.
- F: Doğru tahmin oranı %79,47 ( $600/755 = 0,7947$ ). Bu sınıf için diğerlerine göre daha düşük bir tahmin oranı görünmektedir.

ET algoritması en yüksek doğruluk değerlerinden birine sahiptir (0,9814) ve düşük standart sapması (0,0047) sonuçların istikrarlı olduğunu gösterir. Eğitim süresi (2,17 saniye) düşük ve test süresi (0,0269 saniye) kabul edilebilir düzeydedir. Karışıklık matrisi incelendiğinde (Tablo 4),

**Tablo 4.** ET karışıklık matrisi.

	Tahmin N	Tahmin V	Tahmin F
Gerçek N	9199	2	16
Gerçek V	18	1430	29
Gerçek F	111	44	600

- N: Doğru tahmin oranı % 99,80 ( $9199/9217 = 0,9980$ ). Bu sonuç oldukça yüksek bir başarı düzeyini temsil eder.
- V: Doğru tahmin oranı % 96,83 ( $1430/1477 = 0,9683$ ). Bu da genel olarak iyi bir sonuçtur.
- F: Doğru tahmin oranı %79,47 ( $600/755 = 0,7947$ ). Bagging Classifier ile benzer bir sonuç elde edilmiştir.

RF algoritması yüksek doğruluk değeri (0,9804) ve düşük standart sapma (0,0035) ile iyi bir performans göstermektedir. Eğitim süresi (7,24 saniye) ortalama düzeydedir, ancak test süresi (0,0271 saniye) biraz daha uzundur. Karışıklık matrisi incelendiğinde (Tablo 5),

**Tablo 5.** RF karışıklık matrisi.

	Tahmin N	Tahmin V	Tahmin F
Gerçek N	9197	3	17
Gerçek V	17	1430	30
Gerçek F	106	46	603

- N: Doğru tahmin oranı %99,78 ( $9197/9217 = 0,9978$ ). ET Classifier gibi yüksek bir başarı oranıdır.
- V: Doğru tahmin oranı %96,87 ( $1430/1477 = 0,9687$ ). Diğer algoritmalara benzer bir başarı düzeyi var.
- F: Doğru tahmin oranı %79,80 ( $603/755 = 0,7980$ ). Diğer iki algoritma gibi bu sınıfta da benzer bir sonuç.

GB algoritması yüksek doğruluk değeri (0,9785) ve kabul edilebilir düzeydeki standart sapma (0,0038) ile iyi bir performans sergilemektedir. Eğitim süresi (95,58 saniye) diğer algoritmalara göre çok uzun olmakla birlikte, test süresi (0,0062 saniye) oldukça kısadır. Karışıklık matrisi incelendiğinde (Tablo 6),

**Tablo 6.** GB karışıklık matrisi.

	Tahmin N	Tahmin V	Tahmin F
Gerçek N	9191	6	20
Gerçek V	25	1418	34
Gerçek F	107	45	603

- N: Doğru tahmin oranı %99,72 ( $9191/9217 = 0,9972$ ). Diğer algoritmalara yakın yüksek bir başarı oranı.
- V: Doğru tahmin oranı %96,04 ( $1418/1477 = 0,9604$ ). Diğer algoritmalara göre biraz daha düşük.
- F: Doğru tahmin oranı %79,80 ( $603/755 = 0,7980$ ). Diğer algoritmalara benzer.

SVM algoritması yüksek doğruluk değeri (0,9783) ve kabul edilebilir düzeydeki standart sapma (0,0044) ile iyi bir sınıflandırma başarısı sergilemektedir. Eğitim süresi (2,51 saniye) ortalama bir değere sahipken, test süresi (0,2653 saniye) diğer algoritmalara göre çok daha uzundur. Karışıklık matrisi incelendiğinde (Tablo 7),

**Tablo 7.** SVM karışıklık matrisi.

	Tahmin N	Tahmin V	Tahmin F
Gerçek N	9204	6	7
Gerçek V	22	1425	30
Gerçek F	130	45	580

- N: Doğru tahmin oranı %99,86 ( $9204/9217 = 0,9986$ ). Diğer algoritmalar gibi yüksek bir başarı oranı.
- V: Doğru tahmin oranı %96,36 ( $1425/1477 = 0,9636$ ). Diğer algoritmalara benzer bir başarı düzeyi.
- F: Doğru tahmin oranı %76,89 ( $580/755 = 0,7689$ ). Diğer algoritmalara göre daha düşük bir sonuç.

Bulgular değerlendirildiğinde, her bir algoritmanın belirli sınıflarda daha iyi veya daha zayıf performans sergilediği görülmektedir. Ancak birçok yönden ET algoritması ön plana çıkmaktadır. Bu algoritmanın yüksek doğruluk, düşük standart sapma ve hızlı işlem süreleri ile iyi bir performans gösterdiğini söyleyebiliriz. Karışıklık matrisi sonuçları da bu öneriyi desteklemektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen bulgular ve sonuçları ile birlikte sunulan beş üstün makine öğrenme algoritması, gelecekteki araştırmalara öncülük etme potansiyeline sahiptir. Bu alandaki çalışmaların, aritmi sınıflandırma performansını daha da artırmak ve klinik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanmak için daha fazla geliştirme fırsatları sunabileceği akıldta tutulmalıdır.

Yapılan incelemede, MIT-BIH aritmi veri kümesi kullanılarak, aritmi tiplerini sınıflandırmak amacıyla on farklı makine öğrenme algoritması değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, elde edilen veriler detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve en yüksek doğruluk performansını gösteren beş özel makine öğrenme algoritması belirlenmiştir.

Geliştirilen yöntem ve hassas veri işleme ile farklı aritmi tiplerinin makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak kesin bir şekilde sınıflandırılması başarılmıştır. Temel kaynağı MIT-BIH aritmi veri kümesi olan bu çalışmanın kapsamlı deneyler sonucunda elde edilen sonuçları titizlikle değerlendirilmiştir. Başarım, standart sapma, eğitim ve test sürelerine bakıldığında ET algoritmasının %98,14 doğruluk, 0,0047 standart sapma, 2,17 s eğitim ve 0,0269 s cevap süresiyle oldukça başarılı ve pratik uygulamalarda EKG işaretlerinin sınıflandırılması amacıyla kullanım potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışma ile modern makine öğrenmesi tekniklerinin klasik yapay zeka tekniklerine tercih edilebileceği görülmüştür.

## Kaynakça

- [1] Hammad, M., Meshoul, S., Dziwiński, P., Pławiak, P., Elgendy, I. A. 2022. Efficient Lightweight Multimodel Deep Fusion Based on ECG for Arrhythmia Classification. *Sensors*. 22. 9347.
- [2] Wasimuddin, M., Elleithy, K., Abuzneid, A.-S., Faezipour, M., Abuzaghlh, O. 2020. Stages-Based ECG Signal Analysis From Traditional Signal Processing to Machine Learning Approaches: A Survey. *IEEE Access*. 8, 177782-177803.
- [3] Özdemir, A.T. Erken Ventriküler Kasılmalarda YSA Tabanlı Bir Sınıflandırıcının FPGA ile Gerçekleştirilmesi. 2010. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi.
- [4] Özdemir, A.T., Danışman, K. 2011 Fully parallel ANN-based arrhythmia classifier on a single-chip FPGA: FPAAC. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 19(4). 667-687.
- [5] Ma, S., Cui, J., Xiao, W., Liu, L. 2022. Deep Learning-Based Data Augmentation and Model Fusion for Automatic Arrhythmia Identification and Classification Algorithms. *Comput. Intell. Neurosci.* 2022. 1577778.
- [6] Murat, F., Yildirim, O., Talo, M., Baloglu, U.B., Demir, Y., Acharya, U.R. 2020. Application of Deep Learning Techniques for Heartbeats Detection Using ECG Signals-Analysis and Review. *Comput. Biol. Med.* 120. 103726.
- [7] "Electrocardiogram Signal Classification Based on Deep Learning Techniques", 26 Haziran 2023. <https://www.researchsquare.com> (erişim 09 Temmuz 2023).
- [8] Badrinath, R., Navada, A., Narahari, H., Datta, A., Sarojadevi, H. 2019. Deep Learning based Arrhythmia Classification with an ECG Acquisition System. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 9(2). 3849-3852.
- [9] Jain, R., Betrabet, P. R., Rao, B. A., Reddy, N.V.S. 2022. Classification of Cardiac Arrhythmia using improved Feature Selection methods and Ensemble Classifiers. *J. Phys. Conf. Ser.* 2161(1). 012003.
- [10] Kulkarni, V. Y., Sinha, P. K. 2012. Pruning of Random Forest classifiers: A survey and future directions. *International Conference on Data Science & Engineering (ICDSE)*, 18-20 Temmuz, Cochin, Hindistan, 64-68.
- [11] Bonsignori, V., Guidotti, R., Monreale, A. 2021. Deriving a Single Interpretable Model by Merging Tree-Based Classifiers. *Discovery Science: 24th International Conference*, 11-13 Ekim, Halifax, Kanada, 347-357.
- [12] Dutta, S., Bandyopadhyay, S.K. 2020. Early Breast Cancer Prediction using Artificial Intelligence Methods. *J. Eng. Res. Rep.* 13(2). 48-54.
- [13] Özdemir, A.T., Barshan B. 2014. Detecting falls with wearable sensors using machine learning techniques. *Sensors* 14 (6), 10691-10708.
- [14] Özdemir, A.T. 2016. An analysis on sensor locations of the human body for wearable fall detection devices: Principles and practice. *Sensors* 16 (8), 1161.
- [15] Yildiz, F., Özdemir, A.T. 2019. Prediction of laser-induced thermal damage with artificial neural networks. *Laser Physics* 29 (7), 075205.
- [16] Kavuncuoğlu, E., Uzunhisarcıklı, E., Barshan, B., Özdemir, A.T. 2022. Investigating the Performance of Wearable Motion Sensors on recognizing falls and daily activities via machine learning. *Digital Signal Processing* 126, 103365.
- [17] Mohammednour, A.B, Özdemir A.T. 2020. GNSS positioning accuracy improvement based on surface meteorological parameters using artificial neural networks. *International Journal of Communication Systems* 33 (9), e4373.

- [18] Kavuncuoğlu, E., Yıldız, F., Özdemir, A.T. 2022. Artificial Intelligence (AI) algorithms for evaluation of optical fiber scintillation detector performance. Optik 258, 168791.

## PEM Yakıt Hücresi Ömrünü Uzatmaya Yönelik Temel Seri Pozitif Süper Gerilim Yükseltmeli Luo Çevirici Tasarımı

Ahmet Gani\*<sup>1</sup> 

\*1 Kayseri Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 11.09.2023, Kabul / Accepted: 17.10.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Anahtar Kelime 1, Temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici  
Anahtar Kelime 2, PEM yakıt hücresi  
Anahtar Kelime 3, Oransal+integral anti-wind-up denetleyici

**Öz:** Sürdürülebilir enerji kaynaklarından birisi olan PEM yakıt hücreleri düşük hacim, yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Kararlı çalışma süresince yakıt hücresi çıkış akımı dalgalılık oranının fazla olması, yakıt hücresi çalışma ömrünü kısaltacağından, güç aktarımında kullanılacak çeviricinin bu durumu iyileştirecek devre yapısına sahip olması gerekmektedir. Bu çalışmada, çıkış gerilimi düşük değerlerde olan PEM yakıt hücresi için giriş akım dalgalılık oranı düşük, gerilim dönüştürme oranı yüksek temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici önerilmiştir. Aynı zamanda, önerilen çeviricinin çıkış geriliminin belirli bir gerilim değerinde sabit tutulması için oransal+integral anti-wind-up denetleyici tasarlanmıştır. Yakıt hücresi ve önerilen çeviriciden oluşan benzetim modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş olup çevirici çıkış geriliminin denetimi oransal+integral anti-wind-up denetleyici ile yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında yakıt hücresi için nominal çalışma şartlarında oransal+integral anti-wind-up denetleyicinin dinamik performansı; farklı basamak referans giriş gerilimi ve ani yük değişimlerinde ise oransal+integral anti-wind-up denetleyici ve oransal+integral denetleyicinin dinamik performansları birlikte incelenmiştir. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlara göre önerilen çevirici ve denetleyici yapısı ile yakıt hücresi akım dalgalılığı azaltılarak devre güç yoğunluğu artırılmaktadır.

## Design of Basic Series Positive Super Voltage Lift Luo Converter to Prolong PEM Fuel Cell Life

### Keywords

Keywords 1,Basic series positive super voltage lift Luo converter  
Keywords 2,PEM fuel cell  
Keywords 3, Proportional + integral anti-wind-up controller

**Abstract:** PEM fuel cells, one of the sustainable energy sources, offer significant advantages such as low volume, high power density and efficiency. Since a high fuel cell output current fluctuation ratio during stable operation is likely to shorten the fuel cell operating life, the converter to be used for power transfer must possess a circuit structure that will improve it. In this study, basic series positive super voltage lift Luo converter with a low input fluctuation ratio and a high voltage conversion ratio is proposed for the PEM fuel cell with a low output voltage. At the same time, a proportional+integral anti-wind-up controller was designed to keep the output voltage of the proposed converter constant at a certain voltage value. The simulation model consisting of a fuel cell and proposed converter was created in Matlab/Simulink environment, and the converter output voltage was controlled with a proportional + integral anti-wind-up controller. In simulation studies, the dynamic performance of the proportional+integral anti-wind-up controller for the fuel cell under nominal operating conditions; The dynamic performances of the proportional+integral anti-wind-up controller and the proportional+integral controller were examined together under different step reference input voltage and sudden load changes. According to the results obtained from the simulation study, the circuit power density is increased by reducing the fuel cell current fluctuation with the proposed converter and controller structure.

\*İlgili Yazar, email: ahmetgani@kayseri.edu.tr

## 1. Giriş

PEM yakıt hücreleri yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, düşük hacim ve düşük çalışma sıcaklığına sahiptirler [1-3]. Yakıt hücrelerinde verimli güç aktarımı için gerilimi denetlenebilir bir güç elektroniği çevircisine ihtiyaç vardır. Ayrıca, yakıt hücresi ömrünün uzaması için kullanılacak güç elektroniği çevircisi, yakıt hücresinden çekilen akımın dalgalılık oranını azaltmalı ve mümkün olduğunca az salınım yapmalıdır [4]. Literatürde gerilim kazancı sağlamak amacıyla kullanılan Zeta, Cuk, Sepic ve Luo gibi birçok güç elektroniği çevirici devre yapısı mevcuttur [5]. Yukarıda bahsedilen güç elektroniği çevirici devre yapıları arasında Luo çevirici süper gerilim yükseltme yöntemine göre tasarlanmaktadır [6]. Süper gerilim yükseltme yöntemi gerilim kazancını geometrik olarak artırmaktadır. Diğer güç elektroniği çevirici devre yapıları ile karşılaştırıldığında, süper gerilim yükseltmeli Luo güç elektroniği çevircisi daha yüksek verim, daha yüksek gerilim kazancı ve daha düşük anahtarlama kaybına sahiptir [7]. Aynı koşullar altında süper gerilim yükseltmeli Luo çevircinin devre yapısı gereği ortalama indüktör akımı diğer güç elektroniği çevircilerine göre daha azdır. Bu sayede süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici girişindeki güç kaynağından daha az dalgalılıkta ve salınımda akım çekmektedir [8]. Ani gerilim ve yük değişimleri süper gerilim yükseltmeli Luo güç elektroniği çevircinin kararsız çalışmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluğun üstesinden gelebilmek için çevirici mutlaka kapalı bir çevrime sahip denetim sistemi tarafından denetlenmelidir. Kapalı çevrim denetimde sistem çıkışından alınan geri besleme ile doğruluğu daha yüksek bir denetim gerçekleştirilmektedir [9]. Klasik denetim türü olan oransal+integral (PI) anti-wind-up (AW) tipi denetim yapısı ayarlanacak parametre sayısının az olması ve kalıcı durum hatasını azaltması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir [10]. PEM yakıt hücresinde kullanılan güç elektroniği çevirici devre yapılarından, giriş akımının (yakıt hücresinden çekilen akım) dalgalanmasını azaltmaya ve dolayısıyla hücre ömrünü uzatmaya yönelik çalışmalar mevcuttur. A. Kollı ve ark. [11], PEM yakıt hücresi beslemeli izoleli ve izolesiz güç çevircilerinin akım dalgalılık durumlarını detaylıca analiz etmişlerdir. P. Thounthong ve ark. [12], PEM yakıt hücresi beslemeli dört fazlı paralel yükselten güç çevirici ile deneysel ortamda çevircinin akım dalgalılığının azaldığını ve hücre ömrünün uzadığını gözlemlemişlerdir. G. Marsala ve ark. [13], PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmaya yönelik yeni bir yükselten güç çevirici devre topolojisi önermişlerdir. Önerdikleri güç çevirici devre topolojisinin gerçek zamanlı tasarımını gerçekleştirmişlerdir. S.-J. Cheng ve ark. [14], PEM yakıt hücresi giriş akım dalgalanmasını azaltmak için paralel bağlı akım beslemeli tam köprü güç çevircisi önermişlerdir. L. Palma ve ark. [15], yakıt hücresi beslemeli akım ve gerilim modlu çalışan tam köprü güç çevircilerinin giriş düşük akım frekans dalgalılığını iyileştirme performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. E. Yıldız ve ark. [16], paralel yapıli çift anahtarlı düşürücü yükseltici doğru akım güç elektroniği çevircisi kullanarak PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmaya odaklanmışlardır. Bu çalışmada ise daha önceki çalışmalardan farklı olarak PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmak için temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici önerilmiştir. Temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevircinin çıkış (yük) gerilimi düzenlemesi için ise PI+AW denetleyici önerilmiştir. Çalışmanın literatüre ana katkıları şöyle özetlenebilir:

- PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmak için temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici ilk defa önerilmiştir.

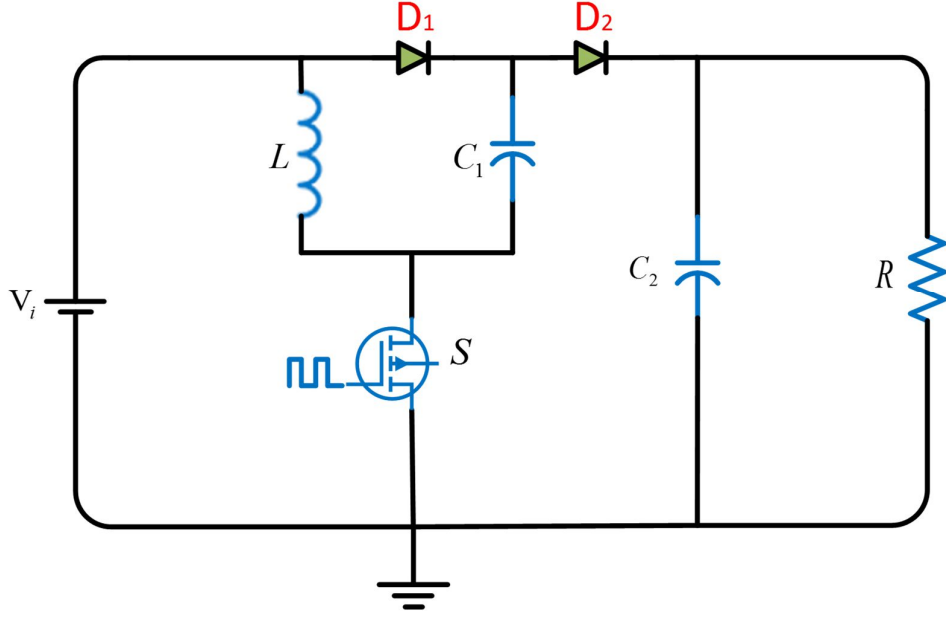
- Önerilen PI+AW denetleyici ile yakıt hücresinden çekilen gücün yük direncine daha verimli (akım dalgalılığı az, güç yoğunluğu yüksek) bir şekilde aktarılmıştır.

Çalışmanın diğer bölümleri şöyle özetlenebilir: İkinci bölümde materyal ve metot sunulmuş olup bulgular ve tartışma üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar bulunmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Temel Seri Pozitif Süper Gerilim Yükseltmeli Luo Çevirici

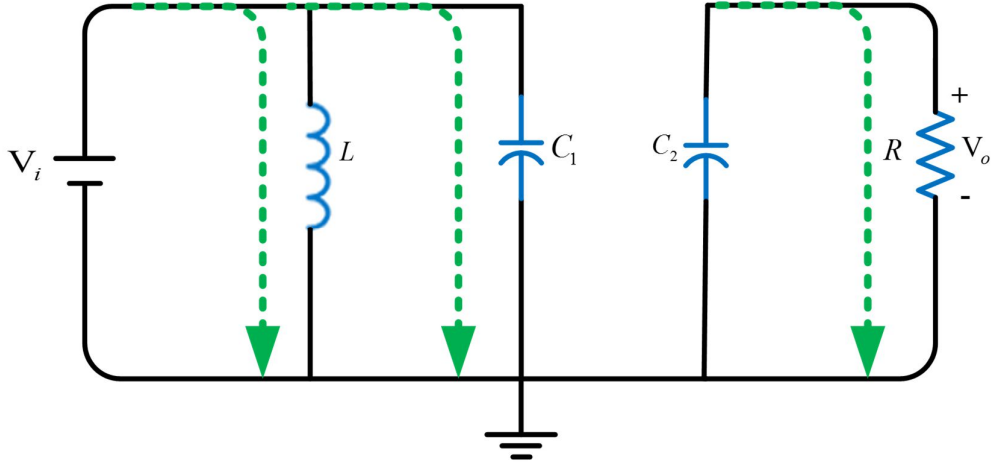
Süper gerilim yükseltmeli Luo çevircilerde iki alt seri bulunmaktadır. Birincisi temel seri, diğeri de ek seridir. Bu çalışmada temel seriden oluşan pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici kullanılmıştır. Temel seri çevirici devre bir yarı iletken anahtarlama elemanı  $S$ ; 1 adet indüktör  $L$ ; 2 adet kapasitör  $C_1, C_2$ ; ve 2 adet diyot içerir. Temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici devre şekil 1'de verilmiştir.



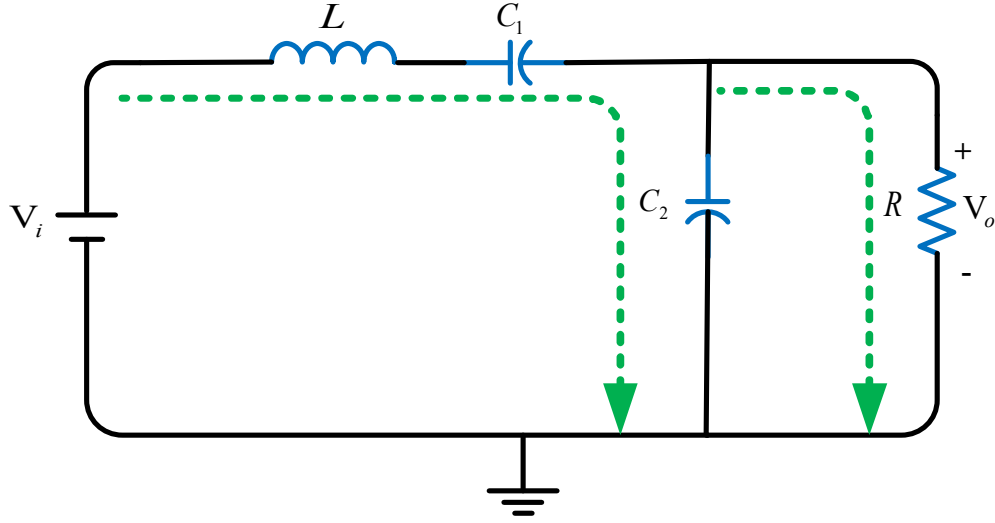
Şekil 1. Temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici

$S$  yarı iletken elemanı ve  $D_1$  diyodunun iletimde olma durumunda şekil 2'deki devre oluşur. Bu durumda  $L$  indüktörü üzerinden akım akar ve  $C_1$  kapasitörü  $V_i$  gerilimi ile yüklenir.  $S$  yarı iletken elemanı ve  $D_1$  diyodunun kesimde olma durumunda ise şekil 3'teki devre oluşur. Bu durumda indüktör üzerindeki gerilim değeri  $(2V_i - V_0)$  değerine azalır [17]. Temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin gerilim kazancı ( $G$ ) aşağıdaki gibi olur.

$$G = \frac{V_0}{V_i} = \frac{2-D}{1-D} \quad (1)$$



Şekil 2.  $S$  yarı iletken elemanı ve  $D_1$  diyodunun iletimde olma durumu



**Şekil 3.** S yarı iletken elemanı ve  $D_1$  diyodunun kesimde olma durumu

Temel seri süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici analizinde,  $L$  indüktöründeki akım değişim oranı ( $\delta$ ) ve  $C_1$ ,  $C_2$  kapasitörleri üzerindeki gerilim değişim oranlarına ( $\varepsilon$ ) bağlı olarak devre eleman sınır değerleri sırasıyla denklem (2-3) kullanılarak hesaplanır.

$$\delta = \frac{D(1-D)^2 R}{2(2-D)fL} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{D}{2RfC_{1,2}} \quad (3)$$

$L$  indüktöründeki akımın değişim oranı ( $\delta$ ) ve  $C_1$ ,  $C_2$  kapasitörlerindeki gerilimlerin değişim oranları ( $\varepsilon$ ) sırasıyla 0.02 ve 0.02 olarak seçilmiştir. Çeviricinin sürekli iletim çalışma modu (SİÇM) için gerçek çevirici eleman değerleri hesaplanan sınır eleman değerlerinden daha yüksek değerde seçilmelidir [18]. Benzetim çalışmaları için belirlenen, hesaplanan ve seçilen temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli çevirici eleman değerleri tablo 1'de verilmiştir.

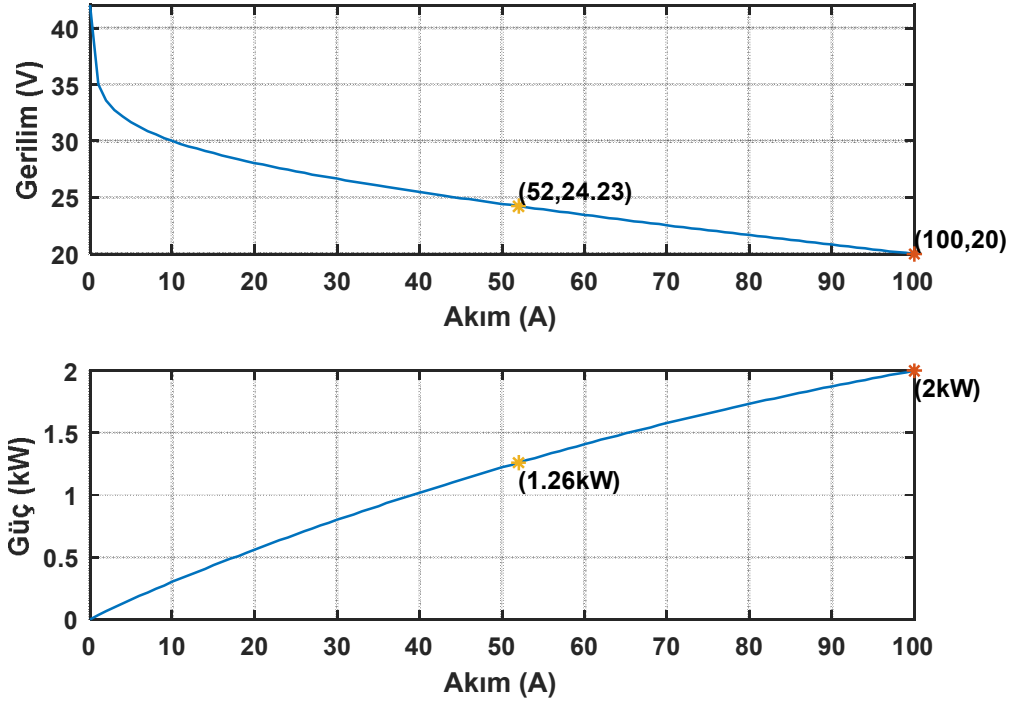
**Tablo 1.** Benzetim çalışması için belirlenen, hesaplanan ve seçilen değerler

Belirlenen değerler		
Giriş Gerilimi	$V_i$	24.23V
Çıkış (Yük) Gerilimi	$V_o$	96.92V
Yük Direnci	$R$	$7\Omega$
Anahtarlama Frekansı	$f$	50Khz
$L$ indüktöründen akan akımın dalgalılık oranı	$\delta$	0.02
$C_{1,2}$ kapasitörlerinin üzerindeki gerilimlerin dalgalılık oranları	$\varepsilon$	0.02
Hesaplanan Sınır Değerler		
İndüktör	$L_K$	0.5mH
Kapasitör	$C_{1,2K}$	18.52 $\mu$ F
Seçilen Değerler		
İndüktör	$L$	10mH
Kapasitör	$C_{1,2}$	220 $\mu$ F



## 2.2. PEM Yakıt Hücresi

PEM yakıt hücresinde, akıma bağlı olarak gerilim ve güç değişimleri doğrusal olmamaktadır. Şekil 4'te 1.26 kW nominal güçte çalışan bir PEM yakıt hücresinin akım-gerilim (I-V) ve akım-güç (I-kW) karakteristiği verilmiştir.

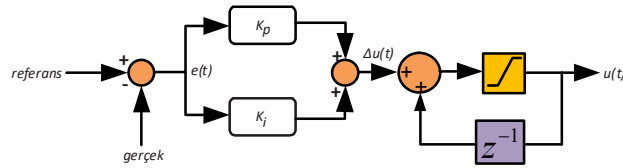


Şekil 4. 1.26kW nominal güçte çalışan bir PEM yakıt hücresinin (I-V) ve (I-kW) karakteristiği

Şekil 4'te I-V karakteristiğinde yakıt hücresinden çekilen akım arttıkça hücre geriliminin düştüğü görülmektedir. I-kW karakteristiğinde ise maksimum güç değerine (2kW) ulaşılan kadar yakıt hücresinden çekilen akım arttıkça, yakıt hücresinden çekilen güç değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Yakıt hücresinden yüke verimli bir güç aktarımı için gerilimi denetlenebilir bir güç çevircisine gereklidir. Aynı zamanda yakıt hücresi ömrünün uzaması için seçilecek güç çevircisi yakıt hücresinden çekilen akımın dalgalılığını mümkün olduğunca en aza indirmelidir [19-20].

## 2.3. PI+ AW Denetleyici

PI+AW denetleyici klasik denetim türlerinden biri olan PI tipi denetim yapısına AW bloğu eklenmesiyle oluşturulur. PI denetleyici denetim sisteminin yükselme zamanını azaltarak geçici durum cevabını iyileştirmektedir. Aynı zamanda yapısındaki AW bloğu sayesinde kalıcı durum hatasını en aza indirmektedir. Şekil 5'te PI+AW denetim yapısı verilmiştir.



Şekil 5. PI+AW denetim yapısı

Şekil 5'ten görüldüğü gibi PI denetleyicinin oransal ( $K_p$ ) ve integral ( $K_i$ ) gibi sabit kazanç parametreleri bulunmaktadır. PI+AW denetim yapısına ait denetim işareti eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

$K_p$  ve  $K_i$  sabit kazanç parametrelerinin değerlerini belirlemek için araştırma literatüründe çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada çevirici matematiksel modeli gerektirmeden sabit kazanç parametresi hesaplayabilen Ziegler-Nichols yöntemi kullanılmıştır [21]. Kazanç parametreleri bu yöntem ile en iyi denetleyici cevabı oluşturacak şekilde  $K_p=0.00625$   $K_i=15$  olarak seçilmiştir. AW bloğunun satürasyon üst ve alt sınır değerleri ise sırasıyla 0.1 ve 0.95 olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de ise PI denetleyicinin sabit kazanç parametrelerinin sistem cevabına olan etkileri verilmiştir.

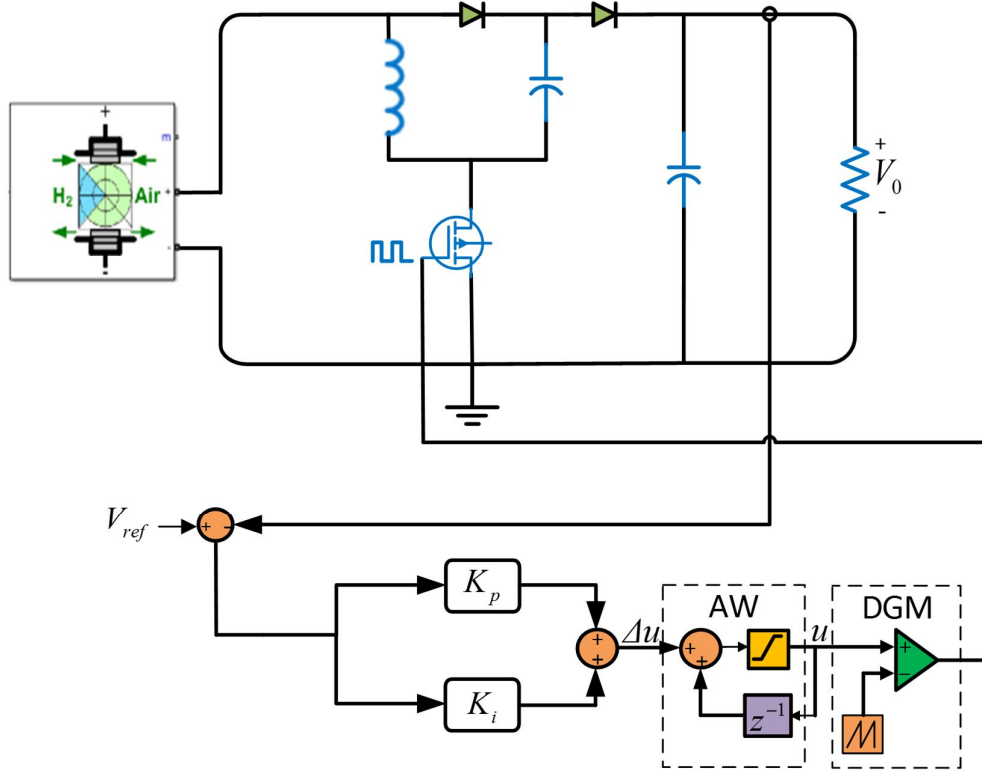
**Tablo 2.** PI denetleyicinin sabit kazanç parametrelerinin sistem cevabına olan etkileri

Parametre	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı durum hatası
$K_p$	Azaltır	Artırır	Az değişir	Azaltır
$K_i$	Azaltır	Artırır	Artırır	Yok eder

### 3. Bulgular

#### 3.1 Benzetim Çalışmaları

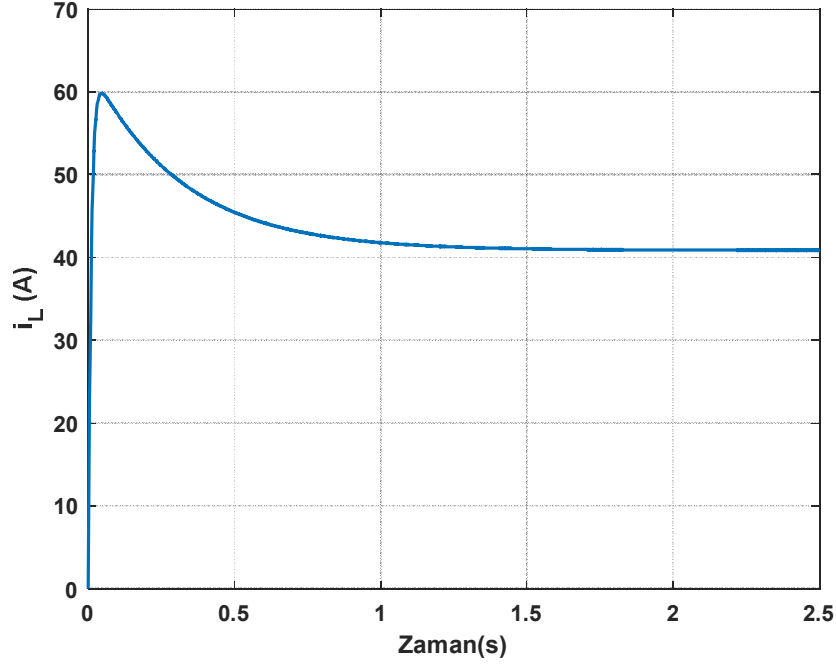
Benzetim çalışmalarında Matlab/Simulink programının 2023a lisanslı versiyonu kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları için kullanılacak pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviriciye ait temel seri devrenin; giriş-çıkış (yük) gerilimi, yük değeri ve anahtarlama frekansı değerleri tablo 1’de belirtilmiştir. Önerilen denetleyici yapısı ile PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin blok diyagramı şekil 6’da verilmiştir.



**Şekil 6.** Önerilen denetleyici yapısı ile PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin blok diyagramı

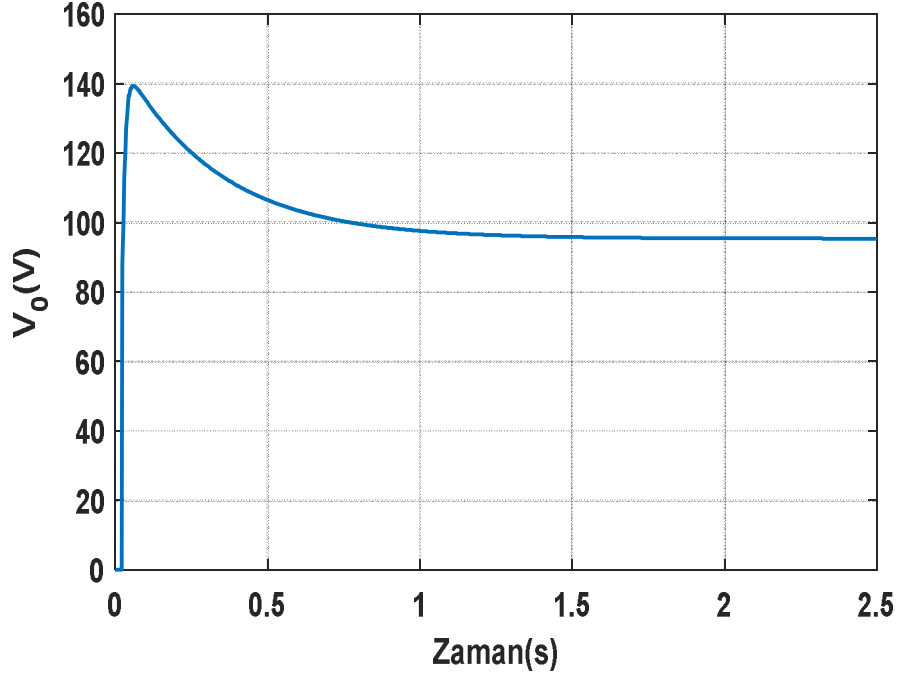
Şekil 6’dan görüleceği üzere  $V_{ref}$  temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin çıkışının ( $V_0$ ) getirilmek istenen referans gerilim değeridir.  $V_0$  ise temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin çıkış (yük) gerilimidir.  $\Delta u$  ise önerilen denetleyicinin denetim işaretindeki değişim olup AW bloğunun girişidir.

AW bloğu çıkışındaki  $u$  denetim işareti darbe genişlik modülasyonu (DGM) bloğu aracılığıyla yarı iletken anahtarlama elemanına uygulanmaktadır. Benzetim çalışmalarında ilk olarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin tablo 1'de verilen tasarım kriterlerine uygunluğu incelenmiştir. Bu amaçla sabit 0.667 anahtarlama oranı için nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici açık çevrim çalıştırılmıştır. Nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin açık çevrim indüktör akımı ve çıkış (yük) gerilimi cevapları sırasıyla şekil 7-8'de verilmiştir.



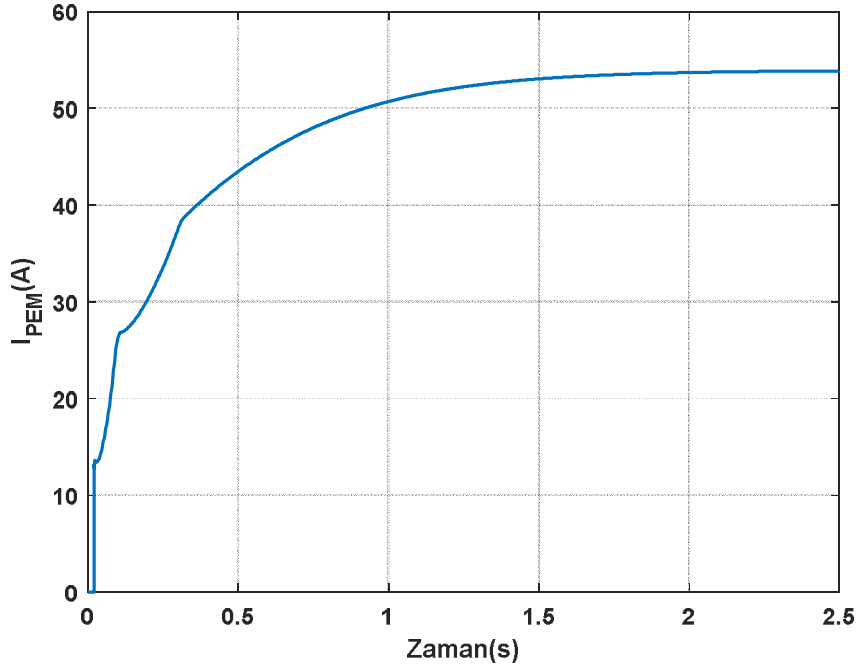
**Şekil 7.** Nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin açık çevrim indüktör akımı cevabı

Şekil 7'de görüldüğü gibi indüktör akımı ( $i_L$ ) belirlenen dalgalılık sınır oranı içerisinde ortalama 43.49 A'dır.



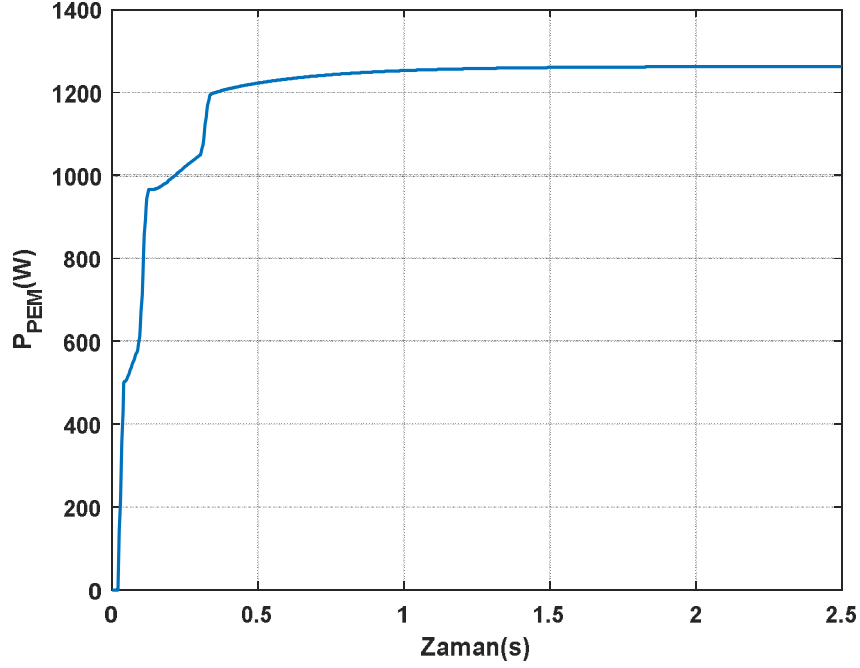
**Şekil 8.** Nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi beslemeli temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çeviricinin açık çevrim çıkış ( $V_o$ ) gerilimi cevabı

Şekil 8'de görüldüğü gibi çıkış gerilimi 96.92V değerine belirlenen sınır dalgalılık oranında oturmuştur. İkinci olarak önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresinden çekilen akım ( $I_{PEM}$ ), güç ( $P_{PEM}$ ) ve hücre gerilim ( $V_{PEM}$ ) değerleri incelenmiştir. Bu değerler sırasıyla şekil 9-10-11'de verilmiştir.



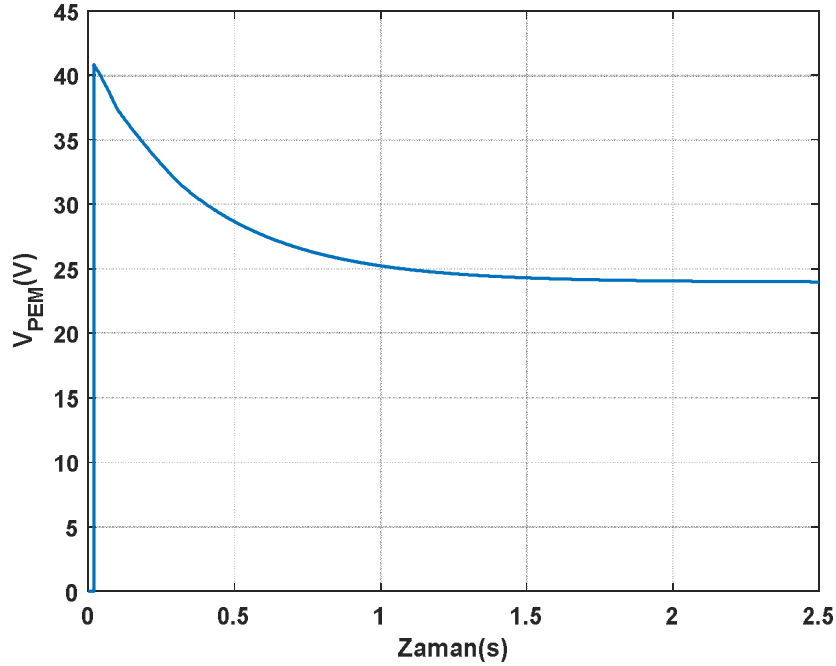
**Şekil 9.** Önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresinden çekilen akım

Şekil 9'da görüldüğü gibi önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresinden çekilen akım 53.87 A'dir.



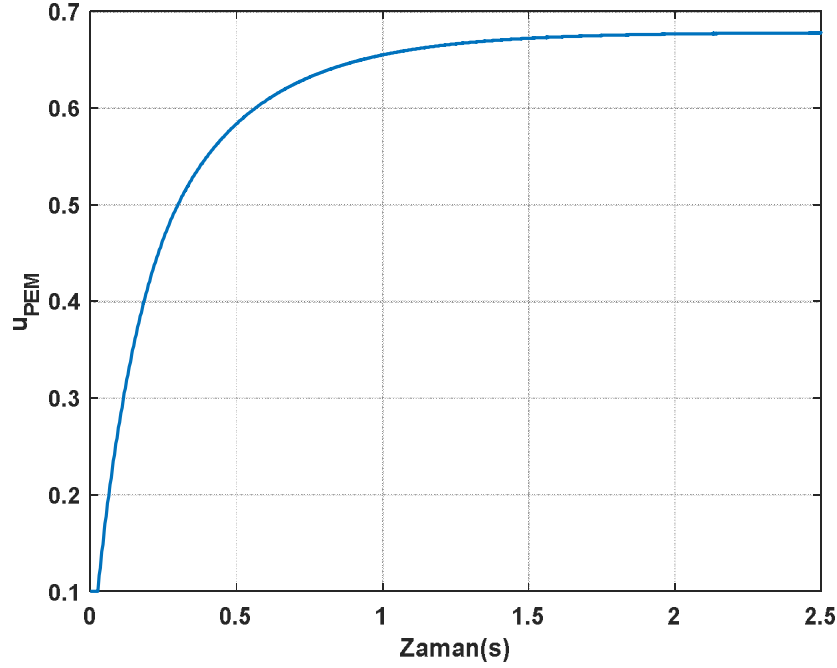
**Şekil 10.** Önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresinden çekilen güç

Şekil 10'da görüldüğü gibi önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresinden çekilen güç 1263 W'tır.



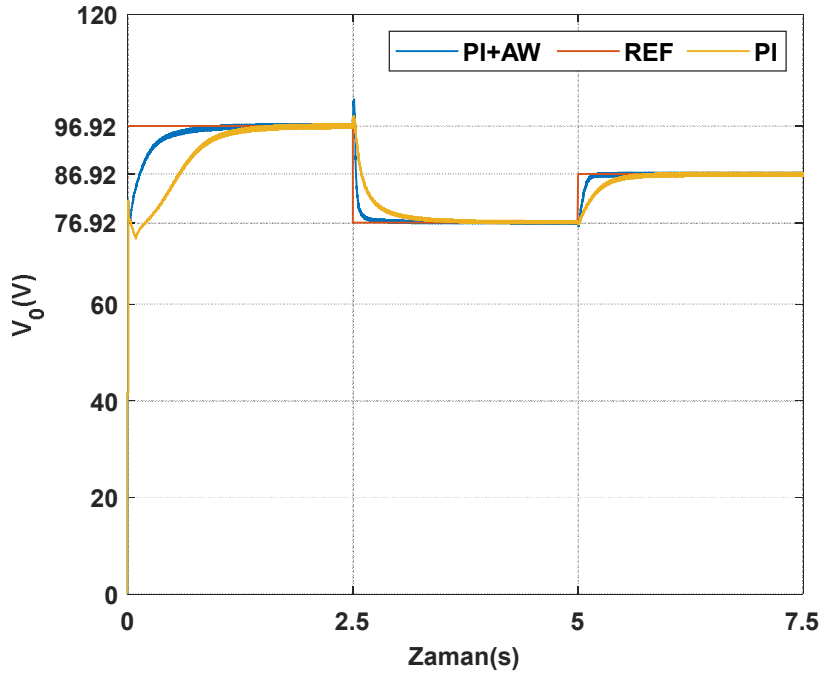
**Şekil 11.** Önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi gerilimi

Şekil 11 incelendiğinde önerilen denetleyici kullanılarak nominal çalışma şartlarında çalışan PEM yakıt hücresi gerilimi 23.99V'tur. Önerilen denetleyicinin denetim işareti ( $u$ ) ise şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Önerilen denetleyicinin denetim işareti

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde, PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmak için tasarlanan çeviricinin belirlenen sınır akım ve gerilim dalgalılık oranlarında önerilen denetleyici kullanılarak yakıt hücresinden çekilen akımın az salınım yaptığı ve kısa zamanda nominal şartlardaki değere yakınsadığı görülmüştür. Benzetim çalışmalarında ikinci olarak, farklı basamak referans giriş gerilimleri için önerilen denetleyicinin yerleşme zamanı denetim performans kriteri PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Basamak fonksiyonu şeklindeki referans giriş gerilim değerleri sırasıyla (96.92V), (76.92V) ve (86.92V)'dur. Değişen basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilimi için önerilen ve PI denetleyicinin çıkış (yük) gerilimi cevapları şekil 13'te verilmiştir.



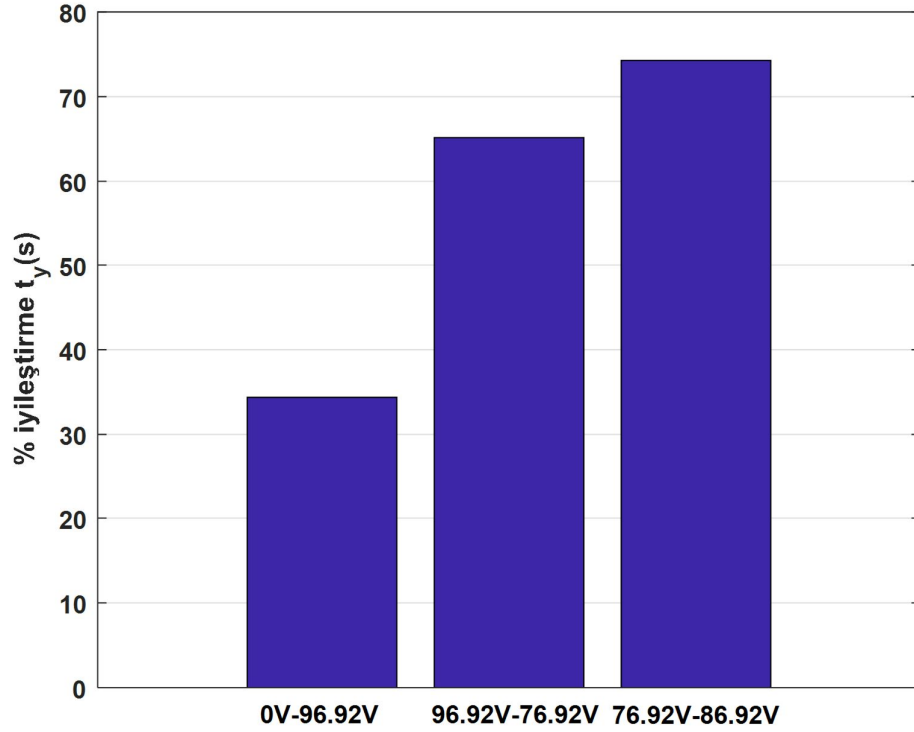
Şekil 13. Değişen basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilim için önerilen ve PI denetleyicinin çıkış (yük) gerilimi cevapları

Şekil 13'ten görüldüğü gibi önerilen denetleyici (0V)→(96.92V) basamak referans gerilim artışında 1.05s sonra referans gerilim değerine ulaşırken, PI denetleyici ise 1.6s sonra referans gerilim değerine ulaşmıştır. (96.92V)→(76.92V) basamak referans gerilim düşümünde önerilen denetleyici 0.31s sonra referans gerilimi yakalarken, PI denetleyici ise 0.89s sonra referans gerilim değerini yakalamıştır. Benzer şekilde (76.92V)→(86.92V) artan referans gerilim değişiminde önerilen denetleyici 0.18s sonra istenilen referans gerilim değerini takip ederken, PI denetleyici ise 0.7s sonra referans gerilim değerini takip etmiştir. Denetleyicilerin basamak geçişlerindeki yerleşme zamanları tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Denetleyicilerin basamak geçişlerindeki yerleşme zamanları ( $t_y$ )

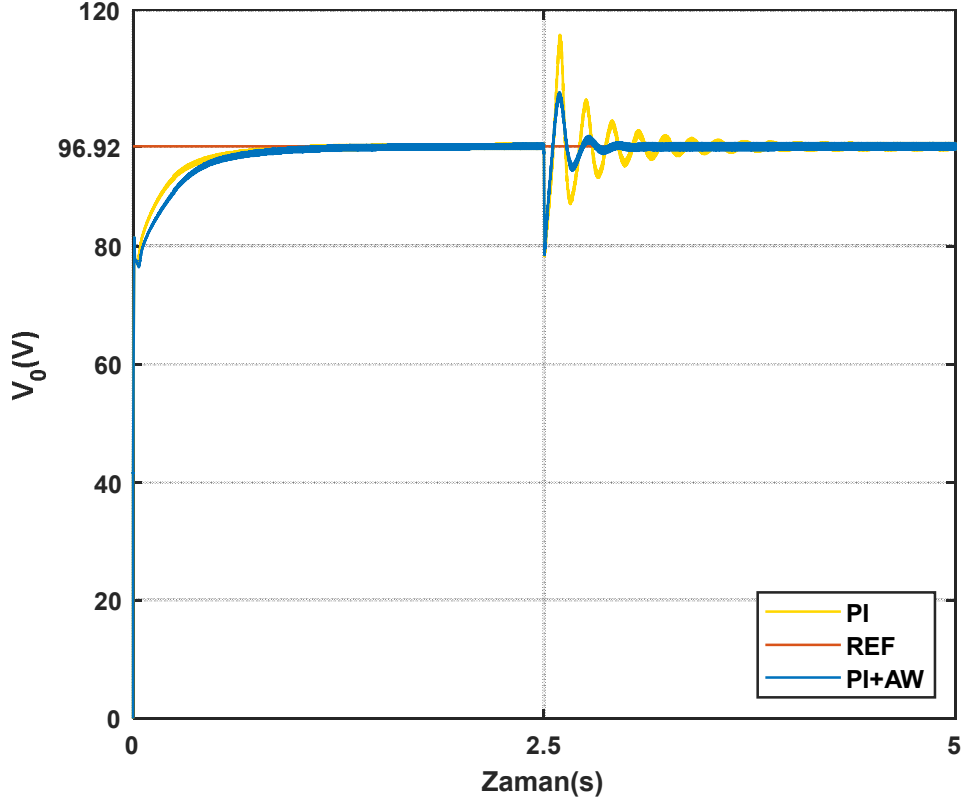
$V_0(V)$	0→96.92		96.92→76.92		76.92→86.92	
	PI+AW	PI	PI+AW	PI	PI+AW	PI
$t_y(s)$	1.05	1.6	0.31	0.89	0.18	0.7

Önerilen denetleyicinin 0V→96.92V, 96.92V→76.92V ve 76.92V→86.92V basamak geçişlerindeki yerleşme zamanı iyileştirme değerleri sırasıyla %34.375, %65.16 ve %74.28'dir. Önerilen denetleyicinin iyileştirme değerleri şekil 14'te verilmiştir.



**Şekil 14.** Önerilen denetleyici iyileştirme değerleri

Benzetim çalışmalarında son olarak yük değişimi yapılarak önerilen denetleyicinin yenilenme zamanı denetim performans kriteri PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Yük değişimi için önerilen ve PI denetleyicinin çıkış (yük) gerilimi cevapları şekil 15'te verilmiştir.



**Şekil 15.** Yük değişimi için önerilen ve PI denetleyicinin çıkış (yük) gerilimi cevapları

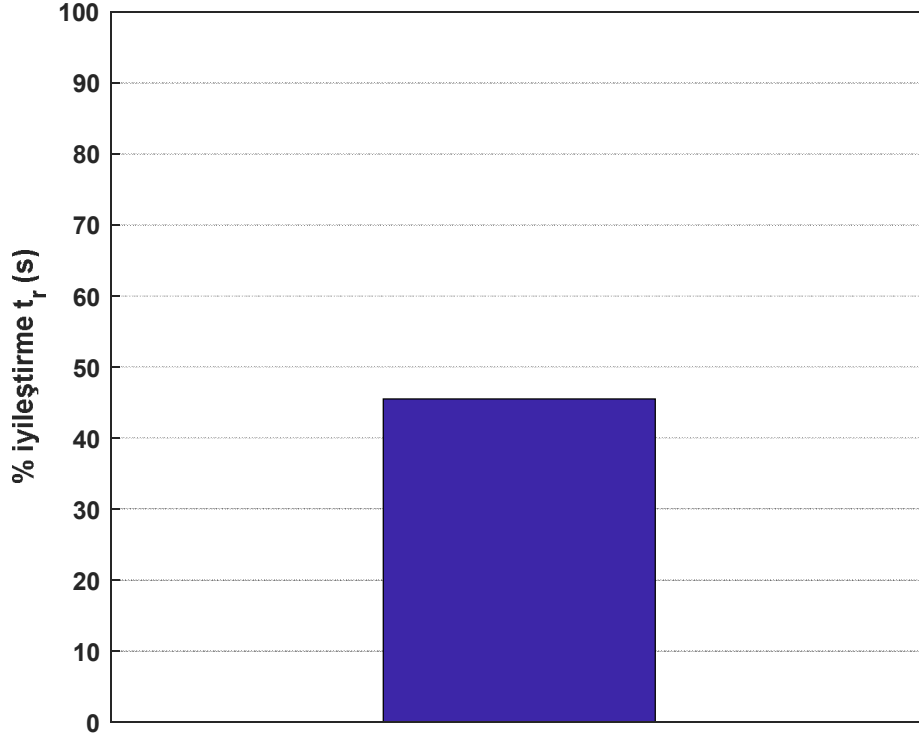
Şekil 15'ten görüldüğü gibi yük değeri  $t = 2.5s$  anında  $7\Omega$  değerinden  $5.6\Omega$  değerine düşürülerek %20 oranında yük değişimi yapılmıştır. Önerilen ve PI denetleyicinin yenilenme zamanı değerleri sırasıyla  $0.72s$  ve  $1.32s$ 'dir. Denetleyicilerin ani yük değişiminde yenilenme zamanı  $t_r$  (s) değerleri tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Denetleyicilerin basamak geçişlerindeki yenilenme zamanları ( $t_r$ )

$R(\Omega)$	$7\Omega \rightarrow 5.6\Omega$	
$t_r(s)$	PI+AW	PI
	0.72	1.32

Önerilen denetleyicinin %20 oranında yük değişiminde yenilenme zamanı  $t_r(s)$  iyileştirme değeri %45.45'dir. Önerilen denetleyicinin iyileştirme değeri şekil 16'da verilmiştir.





Şekil 16.Önerilen denetleyici iyileştirme değeri

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada PEM yakıt hücresi ömrünü uzatmak için yakıt hücresi giriş akımı dalgalılığını azaltan bir temel seri pozitif süper gerilim yükseltmeli Luo çevirici önerilmiş ve önerilen çevirici ile bir yükün yakıt hücresi tarafından denetimli bir şekilde beslenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla PI+AW denetleyici tasarlanmıştır ve PI+AW denetleyicinin dinamik performansı PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışması sonuçlarına göre önerilen denetleyici yapısı denetim sisteminin yerleşme zamanını ortalama %57.93 yenilenme zamanını ise %45.45 iyileştirmiştir. Aynı zamanda önerilen çevirici ve denetleyici yapısı ile yakıt hücresi giriş akım dalgalılığı azaltılmakta, kararlı çalışma aralığına hızla ulaşılmaktadır. Tasarlanan çevirici devre yapısı sadece yakıt hücreleri ile değil aynı zamanda elektrikli araçlarda da kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda çevirici giriş akım dalgalılığını azaltan farklı çevirici devre yapıları ve denetim yöntemlerinin incelenmesi hedeflenmektedir.

#### Teşekkür


Bu çalışma Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi FKB-2022-1087 numaralı 'Yüksek Kazançlı DA/DA Çevirici için İleri Bulanık Mantık Tabanlı Denetim Yöntemlerinin Geliştirilmesi' isimli proje ile desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Şefkat, G., Özel, M. A. 2018. PEM Yakıt Pilinin Simulink Modeli ve Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23(2), 351-366.
- [2] Wahdame, B., Girardot, L., Hissel, D., Harel, F., François, X., Candusso, D., Dumercy, L. 2008. Impact of Power Converter Current Ripple on the Durability of a Fuel Cell Stack. In 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1495-1500.
- [3] De Bernardinis, A., Frappé, E., Béthoux, O., Marchand, C., Coquery, G. 2012. Electrical Architecture for High Power Segmented PEM Fuel Cell in Vehicle Application. In 2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, 5-22.
- [4] Choi, W., Enjeti, P. N., Appleby, A. J. 2004. An Advanced Power Converter Topology to Significantly Improve the CO Tolerance of the PEM Fuel Cell Power Systems. In Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 39<sup>th</sup> IAS Annual Meeting 1185-1191.

- [5] Mahdavi, M., Shahriari-Kahkeshi, M., Abjadi, N. R. 2019. An Adaptive Estimator-Based Sliding Mode Control Scheme for Uncertain POESLL Converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55(6), 3551-3560.
- [6] Luo, F. L., Ye, H. 2003. Positive Output Super-Lift Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(1), 105-113.
- [7] Gani, A. 2022. Yüksek Kazançlı Luo Çevirgeç için Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi Tabanlı Gerilim Düzenleyici Tasarımı, *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1),8-13.
- [8] Jazi, H. N., Goudarzian, A., Pourbagher, R., Derakhshandeh, S. Y. 2017. PI and PWM Sliding Mode Control of POESLL Converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 53(5), 2167-2177.
- [9] Rigan, M., Keçecioglu, Ö.F., Gani, A., Şekkeli, M. 2019. Negatif Çıkışlı Luo Dönüştürücünün Analizi ve Denetimi, *International Symposium on Advanced Engineering Technologies*,1080-1085.
- [10] Bereketoğlu, S., Gani, A., Keçecioglu, Ö.F., Şekkeli, M. 2019. Fırçasız DA Motorun Denetimi için PI Denetleyicinin Performansının İncelenmesi, *International Symposium on Advanced Engineering Technologies*,1059-1064.
- [11] Kolli, A., Gaillard, A., De Bernardinis, A., Bethoux, O., Hissel, D., Khatir, Z. 2015. A Review on DC/DC Converter Architectures for Power Fuel Cell Applications. *Energy Conversion and Management*, 105, 716-730.
- [12] Thounthong, P., Sethakul, P., Rael, S., Davat, B. 2008. Modeling and Control of a Fuel Cell Current Control Loop of a 4-Phase Interleaved Step-up Converter for DC Distributed System. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*.230-236.
- [13] Marsala, G., Pucci, M., Rabbeni, R., Vitale, G. 2011. Analysis and Design of a DC-DC Converter with High Boosting and Reduced Current Ripple for PEM FC. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*.1-8.
- [14] Cheng, S. J., Lo, Y. K., Chiu, H. J., Kuo, S. W. 2012. High-Efficiency Digital-Controlled Interleaved Power Converter for High-Power PEM Fuel-Cell Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(2), 773-780.
- [15] Palma, L. 2012. DC/DC Converter Topology Selection for Low Frequency Ripple Reduction in PEM Fuel Cell Applications. In *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* 315-319.
- [16] Yıldız, E., Vural, B., Akar, F. 2016. Current Ripple Minimization of a PEM Fuel Cell via an Interleaved Converter to Prolong the Stack Life. In *2016 19<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies*.1-4.
- [17] Şener, E., Şebeke Bağlantılı İnverterlerde Super Lift Luo Konverter Uygulaması., *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*,67s, Bilecik,2016.
- [18] Gani, A., 2023.PD-Type-2 Fuzzy Neural Network Based Control of a Super-lift Luo Converter Designed for Sustainable Future Energy Applications. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* 561-568.
- [19] Rakhtala, S. M., Ghaderi, R., Ranjbar, N. A. 2011. Prolong the Stack Life of PEM Fuel Cell System via Higher Order Sliding Mode Control. In the *2<sup>nd</sup> International Conference on Control, Instrumentation and Automation*. pp. 13-18.
- [20] Yıldız, E. PEM tipi Yakıt Pillerinde Çıkış Akımının Dalgalanmasını Azaltmaya Yönelik bir DC/DC Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*,80s, İstanbul, 2016.
- [21] Bereketoğlu, S., Açıkgöz, H., Şekkeli, M. 2020. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tabanlı Hız Denetimi. *EMO Bilimsel Dergi*, 10(2), 33-42.

## Niğde İlinin Hayvansal ve Tarımsal Atık Miktarlarının ve Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi

Ruhullah Ali Mert<sup>1</sup> , Öznur Begüm Gökçek<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, Niğde

(Alınış / Received: 19.07.2023, Kabul / Accepted: 09.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Biyokütle Enerjisi,  
Hayvansal Atıklar,  
Tarımsal Atıklar,  
Elde Edilebilir Enerji  
Potansiyeli,  
Hayvansal ve Tarımsal Atık  
Miktarı

**Öz:** Gelişen teknoloji, ekonomik gelişmeler, nüfus artışı ile birlikte enerjiye olan ihtiyaca karşılık, fosil kaynaklardaki azalma ve bu kaynakların oluşturduğu çevre kirliliği problemlerinin ortaya çıkması yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve yaygın kullanımını kaçınılmaz kılmıştır. Bu çalışmanın amacı Niğde ilindeki hayvansal ve seçilen tarımsal atıklardan elde edilebilecek enerji potansiyellerini belirlemektir. Bu kapsamda 2020 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) verileri kullanılmıştır. Çalışmada, Niğde ve ilçelerindeki toplam hayvan sayısına göre hayvansal atık miktarı, teorik biyogaz ve elde edilebilir enerji potansiyeli hesapları yapılmıştır. Sonrasında seçilen tarımsal ürünlerin teorik biyokütle potansiyeli, yıllık üretim miktarı ve yapılan kabullere göre her bir atığın elde edilebilir enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hayvansal atık potansiyelinin en fazla olduğu ilçe Altınhisar olarak belirlenmiştir. Niğde ilinin hayvansal atıklardan elde edilebilir enerji potansiyelinin elektrik enerjisi üretimi cinsinden değeri 212.034,278 MWh/yıl'dır. Seçilen tarımsal atıklarından elde edilebilecek enerji potansiyelinin en fazla olduğu ilçe ise Bor olup, Niğde ilinin seçilen tarımsal atıklarından elde edilebilir enerji potansiyelinin elektrik enerjisi üretimi cinsinden değeri 3.849,599 MWh/yıl olduğu belirlenmiştir.

## Investigation of Waste Amount and Energy Potential of Niğde Province in terms of Biomass

### Keywords

Biomass Energy,  
Animal Wastes,  
Agricultural Wastes,  
Obtainable Energy Potential,  
Amount of Animal and  
Agricultural Waste

**Abstract:** In response to the need for energy with developing technology, economic developments and population growth, the decrease in fossil resources and the emergence of environmental pollution problems caused by these resources have made the effective and widespread use of renewable energy resources inevitable. The aim of this study is to determine the energy potential that can be obtained from animal and selected agricultural wastes in Niğde province. In this context, 2020 Turkish Statistical Institute (TUİK) data was used. In the study, the amount of animal waste, theoretical biogas and obtainable energy potential were calculated according to the total number of animals in Niğde and its districts. Afterwards, the theoretical biomass potential of the selected agricultural products, the annual production amount and the obtainable energy potential of each waste were calculated according to the assumptions made. According to the results obtained, the district with the

highest animal waste potential was determined as Altunhisar. The value of the energy potential of Niğde province that can be obtained from animal waste in terms of electrical energy production is 212,034.278 MWh/year. The district with the highest energy potential that can be obtained from the selected agricultural wastes is Bor, and the value of the energy potential that can be obtained from the selected agricultural wastes of Niğde province in terms of electrical energy production has been determined to be 3,849.599 MWh/year.

---

\*İlgili Yazar, email: begumgokcek@ohu.edu.tr

## 1. Giriş

Dünya üzerinde hızla artmakta olan nüfusa bağlı olarak enerji ihtiyacı da artmakta ve küresel bir sorun haline gelmektedir. Sanayileşmenin artması, insanların hayat kalitesini yükseltmek istemeleri bu enerji ihtiyacının temel sebepleri arasında yer almaktadır. Dünya üzerinde artan bu enerji ihtiyacı ülkemizin de gündeminde bulunmaktadır [1,2]. Enerji ihtiyacını karşılayabilen kaynaklar üç kısımda incelenebilmektedir. Bunlar fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji vb.) ve nükleer enerji kaynaklarıdır [3]. Güncel olarak kullanılan yakıtların temeli fosil kaynaklı (linyit, ham petrol, doğal gaz vb.) yakıtlardır. Fosil yakıtlar dünyada elektriğin %60'ını karşılarken, yenilenebilir enerji kaynakları 2020 yılının ilk çeyreğinde küresel elektrik ihtiyacının %26-28'ini karşılamaktadır [4]. Türkiye Elektrik İletişim A.Ş'nin yayınladığı 2020 yılı verilerine göre, Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin %58'inin fosil kaynaklardan %42'sinin ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı görülmektedir. Bununla beraber bilinmelidir ki fosil yakıtlar dünya üzerinde sınırlı kaynaklar olup ve fosil yakıtlara bağımlılık devam ettikçe bu kaynakların azalması ve yok olma tehlikesi de oluşabilmektedir [5].

Fosil yakıtların kullanıldığı proseslerinin çoğunda atmosfere sera gazları kontrolsüz bir şekilde salındığından çevre kirliliğine neden olmaktadır. Kyoto Protokolü ile tüm AB üye ülkeleri dahil olmak üzere sanayileşmiş ülkelerde sera gazı emisyonlarının azaltılması ile ilgili zorunlu hedefler belirlenmiştir. Evrensel ve yasal olarak bağlayıcılığı olan ilk küresel iklim anlaşması olan Paris Antlaşması ile AB, 2030 yılı İklim ve Enerji Çerçevesine uygun olarak sera gazı emisyonlarının azaltılması için çaba göstermektedir. Gösterilen bu çabalar Avrupa Yeşil Mutabakatı ile devam etmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2050'de karbon nötr bir Avrupa yaratmak ve "Sınırdaki karbon düzenlemesi" ile temiz bir enerji sistemine geçiş için çalışmalar yapılmasını hedeflemektedir. Bu hedef ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem arz etmektedir. Sağladıkları sürdürülebilir enerji ve düşük sera gazı emisyonlarından dolayı biyokütle enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre son yıllarda daha fazla ilgi çekmektedir. Biyokütleden elde edilen biyogaz, son yıllarda önem kazanmış, Hindistan ve Çin gibi büyük ülkeler biyogaz üretimine önem vermeye başlamışlardır [6]. Çevrede belli başlı sorunlara (sağlık sorunları, koku vb.) yol açabilecek olan bu atıkların bertaraf edilmeden geri kazanılması hem dünya için hem de ülkemiz için büyük önem taşımaktadır. Atıkların bertaraf edilmesi yerine anaerobik proseslerde kullanmak ve enerji üretmek iklim değişikliğine karşı bir önlem de olabilmektedir. Atıkların fermantasyonu sonucu elde edilen biyogazın saflaştırma prosesi sonrası metan içeriğinin %90'nın üzerine çıkarılması fosil yakıtların kullanımını ve sera gazı emisyonlarını %60-80 oranında düşürebilmektedir [7]. Bu koşullar altında biyokütleden biyogaz üretimi yenilenebilir enerji kaynakları arasında ön plana çıkmaktadır [8].

Biyogaz, anaerobik şartlar altında organik atıkların parçalanması sonucu oluşmaktadır. Anaerobik arıtım üç aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar hidroliz, asit oluşum aşaması ve metan oluşum aşamasıdır [9]. Hidroliz aşamasında proteinler, karbohidratlar ve lipitler aminoasit gibi yüksek molekül ağırlıklı organik maddeler daha küçük yapılara parçalanırlar. İkinci aşama olan asit üretim basamağında asit üreten bakteriler organik maddeyi alkollere ve asetik asitlere dönüştürürler. Son olarak metan oluşum aşamasında ise metanojenler oluşan asit ve karbondioksiti metana dönüştürürler [10]. Bu proses sonucu ortaya metan içeren yanıcı ve doğalgaz benzeri bir gaz çıkmaktadır. Anaerobik prosesler doğada birçok farklı ortamda gerçekleşebilmektedir. Örneğin bu prosesler bataklıklar, sıvı gübre çukurları ve deniz tabanları gibi doğal ortamlarda gerçekleşebilmektedir. Biyogazın içeriğinde metan (%50-75), karbondioksit (%25-50) ve eser miktarda hidrojen, hidrojen sülfür ve azot gibi gazlar bulunabilmektedir [11, 12].

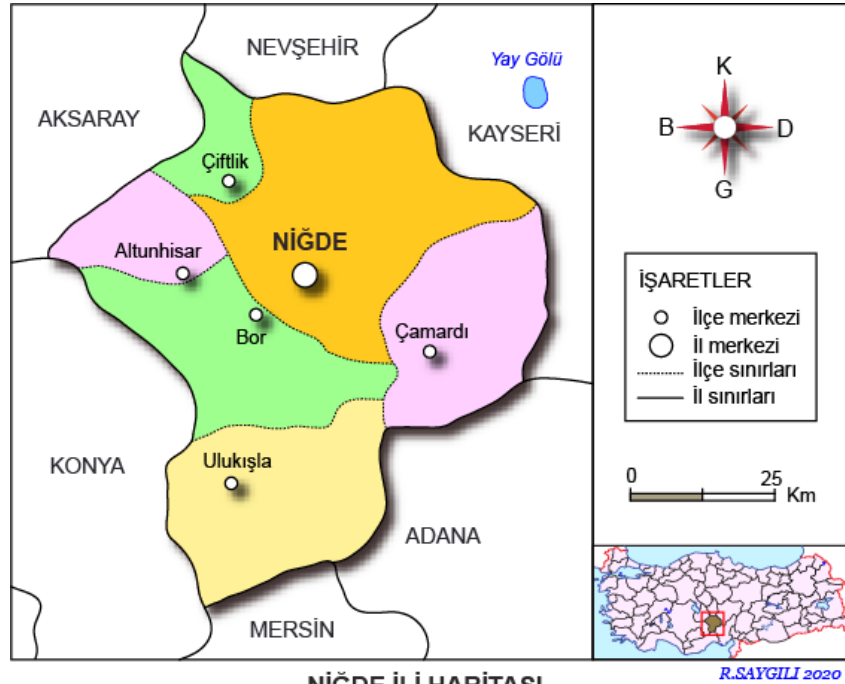
Biyogaz üretimi için birçok farklı organik atık, anaerobik proseslerde ham madde olarak kullanılabilir. Kullanılan organik atıklar, evsel organik katı atık, hayvansal atıklar, tarımsal atıklar, gıda sanayi atıkları ve biyolojik atıklar olarak sınıflandırılabilir. Biyogazın temel bileşeni metandır ve genel olarak biyogazın ısı değerini ifade etmektedir. Biyokütleden üretilen biyogazın ve içeriğinde bulunan metan gazının kullanılması hem organik atık bertarafı için hem de enerji üretimi için çevreci bir yaklaşım sunmaktadır. Aynı zamanda biyogaz üretimi sonucu anaerobik proseslerden çıkabilecek fermante olmuş sıvı ürün (dijestat), tarlalarda gübre olarak da kullanılabilir. Gübre olarak kullanılabilmesinin avantajlarından biri fermantasyon sonucu patojen mikroorganizmaların tamamına yakınının yok olmasıdır [13].

Bu çalışmada Niğde ilinin hayvansal atıklardan ve seçilen tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelini araştırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla, Niğde ilinde bulunan hayvansal atıklardan ve tarımsal faaliyetler sonucu oluşan atıklardan elde edilebilir teorik biyogaz miktarları ve enerji potansiyelleri hesaplanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Çalışma alanı

Niğde ili coğrafi olarak İç Anadolu bölgesinin güneydoğusunda 37.963188 enlem ve 34.659554 boylamlarında yer almaktadır. Yüz ölçümü olarak 7.312 km<sup>2</sup>'dir. Niğde ilinin toplamda merkez ilçe dahil olmak üzere 6 ilçesi bulunmaktadır. Şekil 1'de Niğde İli ve ilçeleri görülmektedir.



NİĞDE İLİ HARİTASI

Şekil 1. Niğde ili haritası

### 2.2. Yöntem

Bu çalışmada, Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) 2020 yılına ait verileri kullanılmıştır [14]. Bu çalışmanın ilk aşamasında Niğde ilinde bulunan büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan sayısı üzerinden yaş gübre miktarı hesabı yapılmış ve elde edilen biyogaz potansiyeli belirlenmiştir. Sonrasında, seçilen tarımsal ürünlerin teorik biyokütle potansiyeli, yıllık üretim miktarı ve yapılan kabullere göre her bir atığın elde edilebilir enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Niğde İl'inde 2020 yılına ait büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan varlığı verileri Tablo 1'de verilmektedir. Toplam büyükbaş hayvan varlığı 186.767 adet olup, en fazla yetiştiricilik Merkez ilçe ve Bor ilçesindedir. Küçükbaş hayvan varlığı 696.137 adet olup, en fazla yetiştiricilik merkez ilçesindedir (Tablo 1). Tablo 1'deki verilen bilgilere göre, Niğde İl genelinde bulunan hayvanların %44'ü kanatlı, %43'ü küçükbaş, %13'ü ise büyükbaş hayvan olarak oranlanmaktadır.

**Tablo 1.** Niğde ili toplam hayvan mevcutları  
İlçeler Bazında Hayvan Mevcutları

İlçe	Büyükbaş	Küçükbaş	Kanatlı Hayvanlar
Merkez	96.643	213.326	285.688
Altunhisar	9.163	51.479	7.331
Bor	39.478	113.695	250.230
Çamardı	5.280	76.391	8.534
Çiftlik	16.000	45.000	19.560
Ulukışla	6.004	77.303	13.501
Toplam	172.568	577.194	585.744

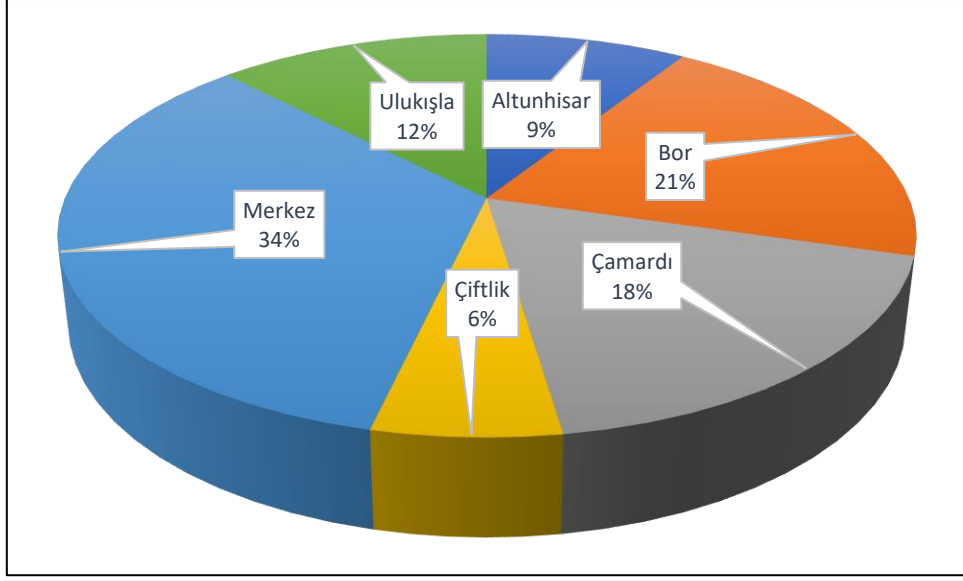
Hayvan gübresi, katı dışkı, sıvı dışkı ve yataklık malzemesinden oluşur. Bu atığın, ortalama %75'i su, %17'si organik maddeler ve % 6'sı ise inorganik maddedir. Büyükbaş hayvanlar için atığın günlük 20-25 kilogramı katı ve 10-12 litresi ise sıvı gübre olarak kabul edilmiştir. Hayvanın cinsine, yaşına, beslenme yoğunluğuna ve besin türüne bağlı olarak bu değerler değişmektedir [15]. Hayvan gübresinden biyogaz oluşumu hesabı, aşağıdaki formüller kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16].

Elde edilebilir atık miktarı (EEA)=Hayvan sayısı (HS)\*hayvan başına yıllık yaş gübre (YYG)\*elde edilebilirlik (EE)

Elde edilebilir biyogaz potansiyeli (EEBP)= EEA\*1 ton yaş gübreden elde edildiği kabul edilen biyogaz miktarı (BM)

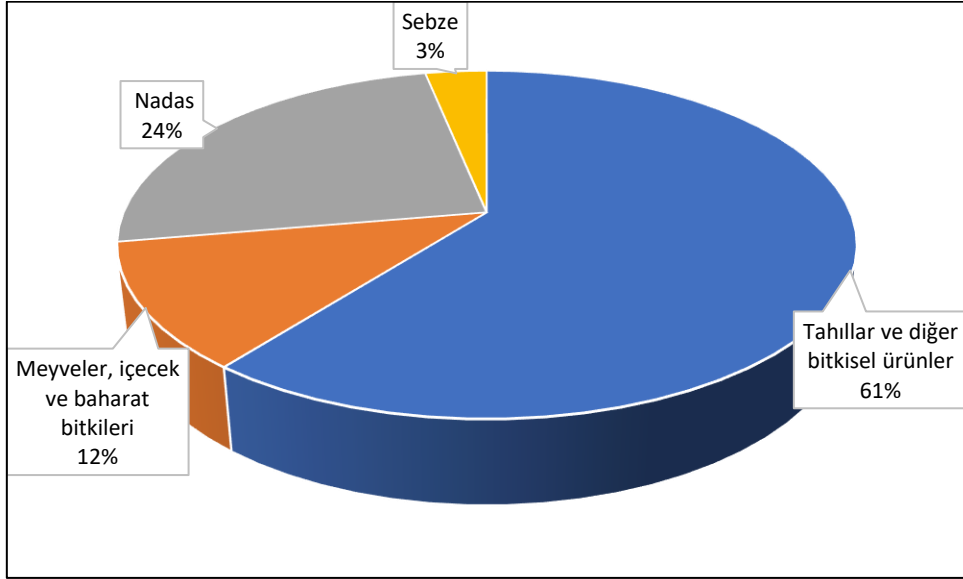
Ortalama olarak, büyükbaş hayvandan 9,94 ton/yıl, küçükbaş hayvandan 0,82 ton/yıl ve kanatlı hayvandan ise 0,029 ton/yıl gübre elde edilir. Büyükbaş hayvan gübrelerinin % 65'inin, küçükbaş hayvanların % 13'ünün ve kümes hayvanlarının % 99'unun meralarda kaybolduğu kabul edilmektedir [17, 18, 19, 20]. Mezofilik (35°C) ve tam karışımli sürekli reaktörlerde gerçekleştirilen koşullarda 1 ton yaş büyükbaş hayvan gübresinden 33 m<sup>3</sup>, küçükbaş hayvan gübresinden 58 m<sup>3</sup> ve kanatlı hayvan gübresinden 78 m<sup>3</sup> biyogaz elde edilebildiği kabul edilmiştir [19, 21, 22]. Hayvansal atıkların ısı değerinin 22,7 MJ/m<sup>3</sup> olduğu kabul edilmiştir [23]. 1 m<sup>3</sup> biyogazın, 4,7 kWh elektriğe eş değer olduğu kabul edilmiştir [17, 24].

2020 yılı TUİK verilerine göre Niğde il genelinde, yaklaşık olarak 2.757.798 dekar tarımsal alan bulunmaktadır. Bu arazilerin %34'ü il merkezinde, %21'i Bor, %18'i Çamardı, %12'si Ulukışla, %9'u Altunhisar ve %6'sı Çiftlik ilçelerinde bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Niğde İli 2020 yılı ekilebilen tarım alanı (dekar)

2020 TÜİK verilerine göre, Niğde İlindeki ekili alanların %61'inde tahıllar ve diğer bitkisel ürünler, %12'sinde meyveler, içecek ve baharat bitkileri ve %3'ünde ise sebze ekilidir. Niğde İl genelindeki ekilebilir alanların ürün grubuna göre oranları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Niğde İli 2020 yılı ürün grubuna göre ekilebilen tarım alanı oranı

2020 yılı TÜİK verilerine göre, Niğde il merkezi ve ilçelerinde toplam 1.728.886 ton ürünün yaklaşık %38'ini tahıl grubundan buğday oluştururken onu %14 ile arpa %10 ile patates ve meyvelerden ise yaklaşık % 14 ile elma takip etmektedir. Niğde İli ve ilçelerindeki tahıl, meyve ve mahsullerinin üretim miktarları sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Niğde İlçelerine göre seçilen tahıl ürünleri üretimi miktarları (ton)

İlçe	Tahıllar						
	Buğday	Arpa	Çavdar	Patates	Şeker Pancarı	Mısır	Yonca

Altunhisar	82.957	13.702	6.510	8.320	159	2.990	5.500
Bor	90.774	52.589	19.000	12.300	12.328	27.300	24.500
Çamardı	116.188	35.661	32.800	3.000	0	520	610
Çiftlik	50.467	4.403	37.100	35.490	0	1.200	760
Merkez	268.715	57.211	24.630	122.810	1.757	28.710	29.400
Ulukışla	63.296	83.524	30.000	900	1.185	1.240	2510
Toplam	672.397	247.090	150.040	182.820	15.429	61.960	63.280

Tablo 3. Niğde İlçelerine göre seçilen meyve ve sebze ürünleri üretimi miktarları (ton)

ilçe	Meyveler ve Sebzeler				
	Üzüm	Elma	Kiraz	Lahana	Domates
Altunhisar	4.500	7.660	260	0	1.710
Bor	11.580	50.920	320	7.500	16.000
Çamardı	3.110	55.010	4.790	10	0
Çiftlik	1.660	5.010	400	0	0
Merkez	7.910	83.480	1.190	7.200	3.750
Ulukışla	5.540	33.070	19.180	4.110	0
Toplam	34.300	235.150	26.140	18.820	21.460

Elde edilen bu verilere göre tarımsal ürün atıklarından teorik biyokütle potansiyeli, teorik enerji potansiyeli ve elde edilebilir enerji potansiyeli aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Teorik biyokütle potansiyeli (TBP) = Ton Olarak Yıllık Üretilen Ürün Miktarı (YÜM) \* Atık-Ürün Oranı (AÜO) \* (100-Ürünün Nemi/100)

Teorik enerji potansiyeli (TEP) = TBP \* Alt ısı değer (AID)

Elde Edilebilir Enerji Potansiyeli (EEP) = TBP \* AID \* EE

Seçilen tahıl, meyve ve sebzelerin yıllık üretim miktarı, ürün-atık oranı, nem bilgisi, alt ısı değeri ve kullanılabilirlik [25] ile ilgili yapılan kabuller Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Seçilen tahıl, meyve ve sebzelerin yıllık üretim miktarı, ürün-atık oranı, nem bilgisi, alt ısı değeri ve kullanılabilirlik değerleri [3, 26].

	YÜM (Ton)	AÜO	Nem (%)	Kullanılabilirlik (%)	AID (MJ/kg)
Buğday	672.397	1,130	13	15	16,700
Arpa	247.090	1,220	13	15	18,500
Çavdar	150.040	0,990	15	15	17,400
Patates	182.820	0,450	60	95	13,600
Şeker Pancarı	15.429	0,130	75	15	16,600
Mısır	61.960	1,880	16	60	17,000
Üzüm	34.300	0,420	45	80	18,000
Elma	235.150	0,190	40	80	17,800
Kiraz	26.140	0,190	40	80	21,700

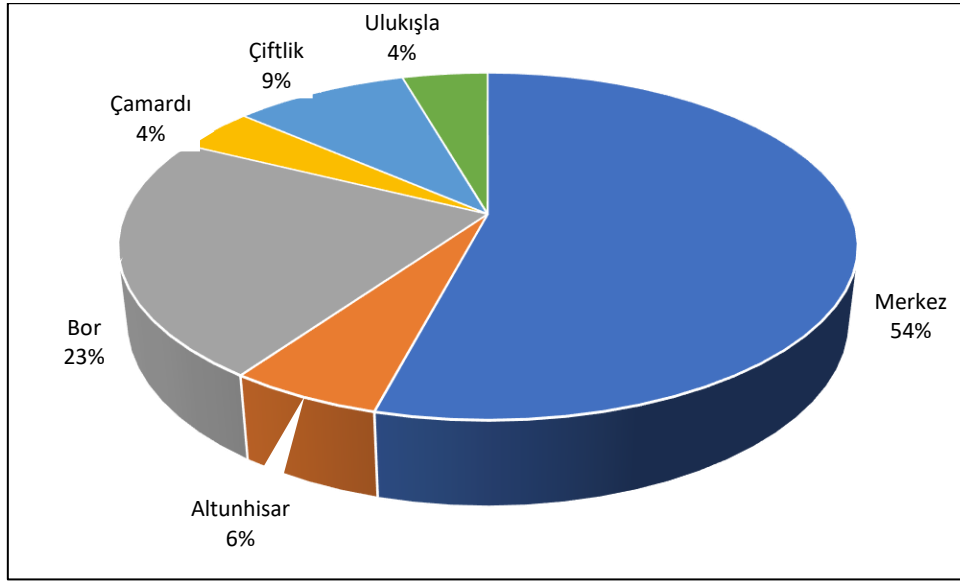


Lahana	18.820	2,500	85	95	12,400
Domates	21.460	0,300	85	95	19,500

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Hayvansal atıkların potansiyeli

Niğde ilçelerindeki hayvan sayısının göz önünde bulundurulmasıyla hesaplanan hayvansal atık miktarı ve kullanılabilir miktarları Tablo 5'te verilmiştir. Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvanların toplam atık miktarı yılda 1.237.404 tondur. Hayvan varlığının %56'sını oluşturan büyükbaş hayvanlardan elde edilen gübre, bu miktarın %90'ından fazlasını oluşturmaktadır. Kullanılabilir atık miktarının ilçeler bazında oransal dağılımına bakıldığında, merkez ilçesi %54 ile en yüksek oranda yer almaktadır. Bor ilçesi ise % 23 ile ikinci sırada yer almaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Kullanılabilir atık miktarının ilçelere göre oransal dağılımı

Tablo 5. Niğde ilçelerine göre hayvansal atık potansiyeli ve kullanılabilen atık miktarları

İlçe	Toplam atık (ton/yıl)			Kullanılabilen atık (ton/yıl)		
	Büyükbaş	Küçükbaş	Kanatlı Hayvanlar	Büyükbaş	Küçükbaş	Kanatlı Hayvanlar
Merkez	960.631,400	174.927,320	8.570,640	624.410,400	22.740,550	22.513,150
Altunhisar	91.080,220	42.212,780	219,930	59.202,140	5.487,661	5.432,780
Bor	392.411,300	93.229,900	7.506,900	255.067,400	12.119,890	11.998,690
Çamardı	52.483,200	62.640,620	256,020	34.114,080	8.143,281	8.061,850
Çiftlik	159.040	36.900	586,8	103.376	4.797	4.749,030
Ulukışla	59.679,76	63.388,46	405,03	3.8791,84	8.240,5	8.158,09

Toplam	1.715.326	473.299,08	17.572,32	1.114.962	61.528,88	60.913,59
--------	-----------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Niğde'nin ilçelerine göre elde edilebilecek biyogaz ve elektrik enerjisi potansiyeli ise Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Niğde İlçelerine göre büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan atıklarından elde edilen biyogaz üretim potansiyeli

İlçeler Bazında Yıllık Yaş Gübreden Biyogaz Üretim Hesabı (m3/Yıl)			
İlçe	Büyükbaş	Küçükbaş	Kanatlı Hayvanlar
Merkez	20.605.544	1.318.951,993	1.756.025,395
Altunhisar	1.953.670,720	318.284,361	423.757,213
Bor	8.417.222,810	702.953,446	935.897,674
Çamardı	1.125.764,640	472.310,274	628.824,128
Çiftlik	3.411.408	278.226	370.424,340
Ulukışla	1.280.130,850	477.948,988	636.331,395
Toplam	36.793.741	3.568.675,063	4.751.260,144

Niğde ilinin hayvansal atıklardan elde edilen yıllık biyogaz enerjisi potansiyelinin günümüzde kullanılan enerji kaynaklarındaki eşdeğeri Tablo 7'de verilmiştir. İl genelinde yılda elde edilebilecek biyogaz miktarının yaklaşık 212 milyon kWh elektrik enerjisine ve 1 trilyon MJ ısı enerjisiye eşdeğer olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7'ye göre Niğde'de, hayvansal atık kaynaklı biyogaz yılda yaklaşık 212.000 MWh elektrik enerjisi üretebilir. 26 MW'lık bir biyokütle enerji santrali, yılda 8.000 saat elektrik santralini çalışacağı düşünüldüğünde kurulabilir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlasına (BEPA) göre, Niğde ili Bor ilçesinde hayvansal biyokütle kaynaklı lisanslı elektrik üretim santrali bulunmaktadır. Bu santral toplam 5,335 MW kurulu güce sahiptir. Ayrıca il genelinde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan 2021 Enerji Yatırımları raporunda 2,33 ve 2 MW kurulu güçlerinde 2 biyokütle enerji santrali kurulmasının planlandığı belirtilmektedir.

Niğde ilinde toplam 26 MW'lık hayvansal biyokütle kaynaklı biyogaz elektrik santrali potansiyeli bulunuyorken, bunun sadece 5,35 MW'lık yaklaşık %20'si kullanılabilir durumdadır. Bölgenin potansiyel organik atık miktarı göz önüne alındığında, önemli bir boşluk olduğu açıktır. Bu durum, bölgenin gelişimi göz önünde bulundurulduğunda yeni biyogaz enerji santrali kurmanın cazip olduğunu göstermektedir.

**Tablo 7.** Niğde ili genelinde üretilebilecek biyogazın ısı ve elektriksel eşdeğerleri

	Isıl Eşdeğeri (MJ/yıl)	Elektriksel Eşdeğeri (MWh/yıl)
Büyükbaş hayvan	835.217.920,700	172.930,583
Küçükbaş hayvan	81.008.923,930	16.772,773
Kanatlı hayvan	107.853.605,300	22.330,923
Toplam	10.240.80450	212.034,278

### 3.2. Tarımsal atıkların potansiyeli

Niğde İli ve ilçeleri için bu çalışmada seçilen tarımsal ürünlerin 2020 yılı üretim miktarı 1.728.886 tondur [14]. Seçilen tahıl ürünleri ve meyve-sebzelerin ilçelere göre teorik biyokütle potansiyelleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5'e göre, tahıl ürünlerinden elde edilebilir en yüksek biyokütle potansiyeli 99957,04 ton ile Ulukışla ilçesinin buğday üretiminden, en düşük biyokütle potansiyeli ise 5,17 ton ile Altunhisar ilçesinin şeker pancarı üretiminden elde edilmektedir. İlçelerin tahıl ürünlerinin biyokütle potansiyellerine bakıldığında en yüksek değerlerin buğday, arpa, patates ve çavdar ürünlerinde olduğu gözlemlenirken düşük değerlerin şeker pancarı ve mısır üretiminde olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.** Niğde İlçelerine göre seçilen tahıl ürünlerinin teorik biyokütle potansiyeli (ton)

	Buğday	Arpa	Çavdar	Patates	Şeker Pancarı	Mısır
Altunhisar	81.555,030	14.543,300	5.478,165	1.497,600	5,168	4.721,808
Bor	96.347,520	44.253,640	3.420	399,750	19.468,380	6.306,300
Çamardı	97.772,200	6.418,980	1.066	4.737,600	-	59,280
Çiftlik	9.084,060	143,098	58.588,320	8.198,190	-	136,800
Merkez	8.733,238	90.347,610	5.689,530	14.000,340	200,298	10.766,250
Ulukışla	99.957,040	19.294,040	3.420	102,600	444,375	55,800

Tablo 6'ya göre, meyve ve sebze ürünlerinden elde edilebilir en yüksek biyokütle potansiyeli 20628,75 ton ile Çamardı ilçesinin elma üretiminden elde edilmektedir. İlçelerin meyve ve sebze ürünlerinin biyokütle potansiyellerine bakıldığında en yüksek değerlerin elma ve üzüm ürünlerinde olduğu gözlemlenirken düşük değerlerin kiraz, lahana ve domates üretiminde olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Niğde İlçelerine göre seçilen meyve ve sebzelerin teorik biyokütle potansiyeli (ton)

	Üzüm	Elma	Kiraz	Lahana	Domates
Altunhisar	1.039,500	873,240	29,640	-	76,950
Bor	1.320,120	5.804,880	120	337,500	-
Çamardı	354,540	20.628,750	215,550	-	-
Çiftlik	622,500	225,450	-	-	-
Merkez	355,950	-	-	-	-
Ulukışla	-	-	-	-	-

İl genelindeki seçilen tarımsal ürünlerin toplam biyokütle potansiyeli değerlendirildiğinde en yüksek değerlerin buğday, arpa, elma ve patateste elde edildiği görülürken, en düşük değerlerin ise şeker pancarı ve lahana üretiminden elde edildiği görülmektedir.

Tablo 7'de Niğde İli genelinde tarımsal ürünlerin teorik enerji potansiyeline bakıldığında tahıl ürünleri açısından en yüksek enerji potansiyelinin buğday ürününden, meyve ve sebze ürünleri açısından en yüksek enerji potansiyelinin elma ürününden elde edildiği görülmektedir.

**Tablo 7.** Niğde İl'inde üretilen tahıl, meyve ve sebze ürünlerinden elde edilen teorik enerji potansiyeli

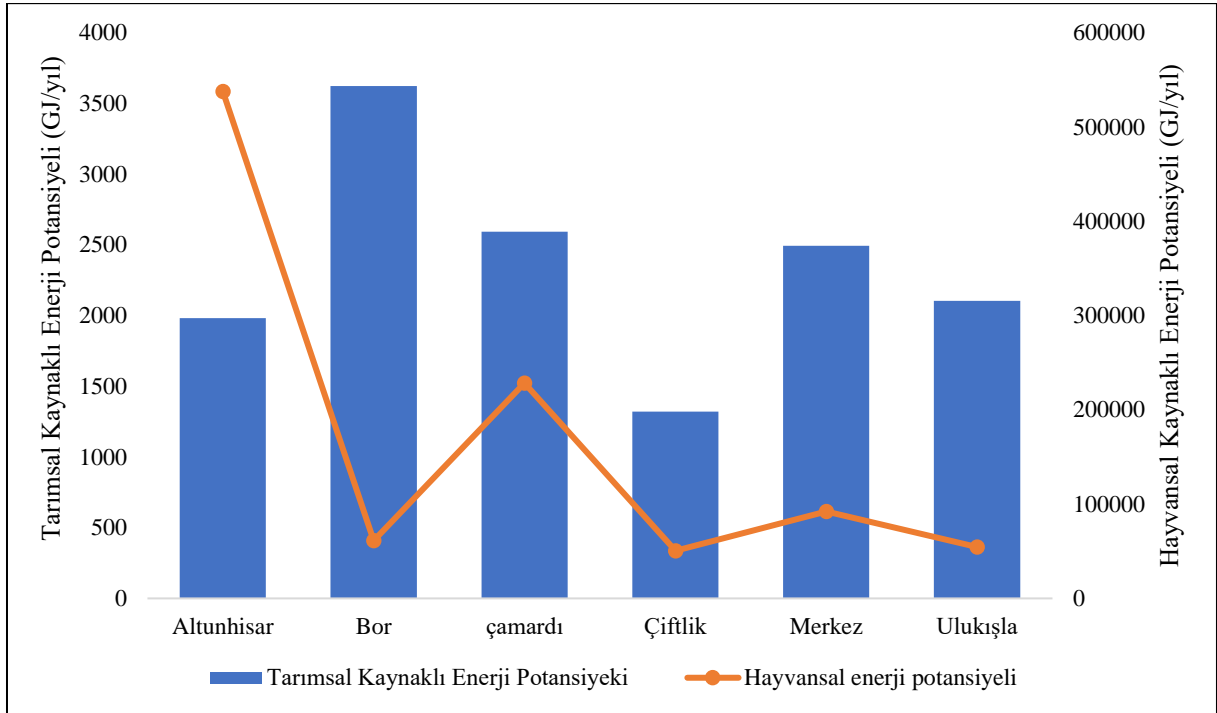
	TEP (MJ)
Buğday	11.039.259,290
Arpa	4.851.834,531
Çavdar	2.196.900,684
Patates	447.543,360
Şeker Pancarı	8.323,946
Mısır	1.663.402,944
Üzüm	142.619,400
Elma	477.166,380
Kiraz	64.665,132
Lahana	87.513
Domates	18.831,150

Tablo 8'de Niğde İli genelinde tarımsal ürünlerin elde edilebilir enerji potansiyeline bakıldığında, tahıl ürünleri açısından en yüksek elde edilebilir enerji potansiyelinin buğday ürününden, meyve ve sebze ürünleri açısından en yüksek enerji potansiyelinin elma ürününden elde edildiği görülmektedir.

**Tablo 8.** Niğde İl'inde üretilen tahıl, meyve ve sebze ürünlerinin elde edilebilir enerji potansiyeli

	EEP (MJ/yıl)	MWh/yıl
Buğday	165.588.889,400	1971,180
Arpa	72.777.517,970	971,254
Çavdar	32.953.510,260	405,396
Patates	42.516.619,200	118,059
Şeker Pancarı	124.859,183	100,189
Mısır	99.804.176,640	112,436
Üzüm	11.409.552	19,940
Elma	38.173.310,400	147,023
Kiraz	5.173.210,560	2,377
Lahana	8.313.735	1,255
Domates	1.788.959,250	0,450

Niğde ilçelerine göre tarımsal ve hayvansal atıkların enerji potansiyelleri Şekil 5'te görülmektedir. Grafiğe göre tarımsal atık potansiyelinin en yüksek olduğu ilçe Bor İlçesidir. Hayvansal atık potansiyelinin en yüksek olduğu ilçe ise Altunhisar ilçesidir. Her iki atık potansiyelinin en düşük olduğu ilçe Çiftlik ilçesidir.



Şekil 5. Niğde ilçelerine göre tarımsal ve hayvansal atıkların enerji potansiyelleri

#### 4. Sonuçlar

2020 yılı TÜİK verilerinin kullanıldığı Niğde İli için yapılan bu çalışmada hem tarım hem de hayvancılık faaliyetleri sonucunda oluşacak atıklardan elde edilebilecek enerji potansiyelleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda il genelinde toplam hayvansal atıklardan yıllık 1.024.080,45 GJ enerji değeri ve elektrik enerjisi üretimi cinsinden 212.034,278 MWh/yıl belirlenmiştir. Çalışma kapsamında seçilen bazı tarımsal atıklardan yıllık 14.110,76 GJ enerji değeri ve elektrik enerjisi üretimi cinsinden 3.849,599 MWh/yıl enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Seçilen tarımsal atıklar açısından değerlendirildiğinde en yüksek teorik enerji potansiyeli buğday ürününde yıllık 11.039.259,29 MJ olarak belirlenmiştir. Hayvan atıkları açısından değerlendirildiğinde ise en yüksek teorik enerji potansiyeli büyükbaş hayvan atığında yıllık 835.217.920,7

MJ olarak belirlenmiştir. Tarımsal atık potansiyelinin en yüksek olduğu ilçe Bor İlçesidir. Hayvansal atık potansiyelinin en yüksek olduğu ilçe ise Altunhisar ilçesidir.

Bu çalışmada hesaplanan enerji potansiyelleri; evlerde, ocak, aydınlanma, ısınma ve sanayide; elektrik ve ısı enerjisi elde edilmesinde, tarım da ise sera ısıtmada kullanılabilir. Biyokütle enerjisinin kullanımı ile ilgili özellikle hayvansal atıklardan hesaplanan enerji potansiyeli ile ilgili yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Ancak seçilen bölgelerin ya da illerin tarımsal atık kaynaklı enerji potansiyeli hesabı ile ilgili çalışmalar daha az bulunmaktadır.

Bölgelerde ya da illerde o bölgenin iklim özelliklerine göre üretimi yapılan tarımsal ürün atıklarının enerjiye dönüştürülmesi hem ekonomik yönden hem de enerji güvenliği yönünden önem arz etmektedir. Sonuç olarak ilde enerji potansiyeli olarak değerlendirilecek hem hayvansal kaynaklı atıkların hem de tarımsal atık kaynaklı atıkların biyogaz enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi ekonomiye ve enerji güvenliğine büyük katkı sağlayacaktır.

### Kaynakça

- [1] Taşova M, Yazarel S. 2019. Yozgat İli Hayvansal Kaynaklı Atıkların Biyogaz ve Enerji Potansiyellerinin Belirlenmesi. *International Journal of Life Sciences And Biotechnology*, 2 (1): 16-24.
- [2] Taşova M. 2019. Tokat-Erbaa İlçesindeki Hayvansal Kaynaklı Atıkların Enerji Potansiyel Değerlerinin Belirlenmesi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 12 (1): 14-19.
- [3] Karaca C. 2015. Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 104-109.
- [4] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2020*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> (Erişim Tarihi 07.07.2023).
- [5] Karaca C. 2017. Hatay İlinin Hayvansal Gübre Kaynağından Üretilen Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *MKÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(1):34-39.
- [6] Dhar, S. Kumar, R. Kumar. 2017. A review on organic waste to energy systems in India *Bioresource Technology*, 245. 1229-1237.
- [7] Sahota, S., Shah, G., Ghosh, P., Kapoor, R., Sengupta, S., Singh, P., Vijay, V., Sahay, A. V., Vijay, K., Thakur. I. S. 2018. Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives *Bioresource Technology*, 1. 79-88.
- [8] Avcıoğlu O. A., Türker U., Atasoy D. Z., Koçtürk D. 2011. Tarımsal Kökenli Yenilenebilir Enerjiler Biyoyakıtlar. *Nobel Akademik Yayıncılık*, 519s.
- [9] Vijin P., A. Sivaram, R., Prabhu, N., Sundaramahalingam. A. 2021. A study of enhancing the biogas production in anaerobic digestion *Mater Today Proc*, 45, pp. 7994-7999.
- [10] Kumar, K. S., Lü, F., Wong, J. W. C., Wu, D. İ. H. 2021. *Oechsner Anaerobic digestion beyond biogas Bioresource Technology*, 337. 125378.
- [11] Painuly, J. P., Rao, H., Parikh, J. 1995. A Rural Energy-Agriculture Interaction Model Applied to Karnataka State *Energy*, 20 (3), 219-233.
- [12] Gustavsson, M. 2000. *Biogas Technology. Göteborg: Göteborg University Solution in Search of Its Problem – A Study of Small-Scale Rural Technology Introduction and Integration. International Energy agency. İzmit/Kocaeli*. 253.
- [13] Çetinkaya H. 2016. *Biyogaz. Fırat Kalkınma Ajansı*. [https://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik\\_Dosya\\_Ekleri/FKA\\_Arastirma\\_Raporlari/Biyogaz.pdf](https://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik_Dosya_Ekleri/FKA_Arastirma_Raporlari/Biyogaz.pdf) (Erişim Tarihi 09.07.2023).
- [14] Türkiye İstatistik Kurumu. 2020. *Tarımsal Üretim Miktarı Raporu 2020*. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (Erişim Tarihi 11.07.2023).
- [15] Kocabey S. 2019. Balıkesir İli İçin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17): 234-243.

- [16] Ayhan A. 2015. Biogas production potential from animal manure of Bursa province. Journal of Agricultural Faculty of Uludağ University, 29(2), 47-53.
- [17] Altıkat, S. ve Çelik, A. 2012. Iğdır İlinin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli Biogas Potential from Animal Waste of Iğdır Province. Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der, 2(1), 61-66.
- [18] Baran, M. F., Lüle, F. ve Gökdoğan, O. 2017. Adıyaman İlinin Hayvansal Atıklardan Elde Edilebilecek Enerji Potansiyeli Energy Potential Can Be Produced by Animal Waste of Adıyaman Province. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 4(3), 245-249.
- [19] Kaya, D., Çağman, S., Eyidoğan, M., Aydoner, C., Çoban, V., Tırıs M. 2009. Türkiye'nin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli ve Ekonomisi. Atık Teknolojileri Dergisi, 1.
- [20] Deniz, E., Yeşilören, G., Özdemir, N., İşçi, A. 2015. Türkiye'de Gıda Endüstrisi Kaynaklı Biyokütle ve Biyoyakıt Potansiyeli. GIDA (2015) 40 (1): 47-54 doi: 10.15237/gida.GD14037.
- [21] Bayrak Işık EH, Polat F. 2018. The Biogas Potential That Can Be Obtained from The Animal Wastes of Tokat Province. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7 (3): 93-100.
- [22] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx> (Erişim Tarihi: 10.07.2023).
- [23] Başçetinçelik A., Öztürk H. H., Karaca C., Kaçıra M., Ekinci K., Kaya D. 2006. A guide on exploitation of agricultural residues in Turkey, agro-waste- exploitation of agricultural residues in Turkey Project. EU-Life Programme Project. Project No: LIFE03 TCY/TR/000061.
- [24] Yıldız, O., Sözer, S. 2004. Bazı Bitkisel Atıkların Biyogaz Teknolojisi ile Değerlendirilmesi. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 2, 609-618.
- [25] California Energy Commission, An Assessment of Biomass Resources in California, 2015. University of California, Davis, Public Interest Energy Research (PIER) Program Interim Project Report. March 2015, CEC-500-11-020.
- [26] Avcioğlu, A.O., Dayıoğlu, M.A., Türker, U. 2019. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey . Renewable Energy 138, 610-619.

## S355JR (ST52) Sac Malzemenin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi

İbrahim BUTGÜL <sup>1</sup>, Gültekin Basmacı <sup>2\*</sup>, Levent SAYIN <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, BURDUR

<sup>2\*</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, BURDUR

<sup>3</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, BURDUR

(Alınış / Received: 15.08.2023, Kabul / Accepted: 20.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Plastik şekil verme,  
Sac levha,  
V büküm,  
Geri yaylanma.

**Öz:** Sac metal kalıpları kullanılarak üretimi gerçekleşen parçalar endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır. Tercih edilen uygulama alanlarından birisi de büküm işlemleri kalıpcılıktır. Sac metal levhalara ait kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen şekillenme işleminde başlıca görülen sorun geri yaylanmadır. V büküm işlemi kullanılarak oluşan geri yaylanmalara bakıldığında, kalınlıkları farklı olan malzemelerde, değişik açılardaki oluşan geri yaylanma tutarını gösteren grafiklerin eksik olduğu tespit edilmektedir. Çalışmalar sırasında oluşan geri yaylanma miktarlarını tespit etmek için yapılan V büküm kalıbı ve deney malzemesi olarak S355JR (ST52), sac metal levhada işlem yapılmıştır. Kalınlığı 2 ve 3 mm örnekler 60, 90 ve 120 dereceden oluşan kalıp açıları kullanılarak ve işleme alınan her bir açı için büküm radyüsü 2 mm ve 4 mm değerindekiler kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonrasında numune ürünlerin geri yaylanma miktarlarını tespit edebilmek amacıyla dijital ölçüm cihazından yararlanılmıştır. Deneylerden elde edilen deney sonuçlarının belirli parametrelere göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda S355JR (ST52) sac levhada geri yaylanma gözlemlenmiştir. Büküm kalıp açısı yükseldikçe geri yaylanmanın azaldığı izlenmiştir. Sac levha kalınlığının artmasıyla geri yaylanma miktarının düştüğü ve büküm radyüsü yükseldikçe geri yaylanmanın arttığı belirlenmiştir.

## Experimental Investigation of Springback Behavior in the Bending of S355JR (St52) Sheet Materials

### Keywords

Plastic shaping,  
Sheet metal,  
V-bending,  
Springback.

**Abstract:** The parts produced using sheet metal molds are used in a wide range of industries. Twisting molding is also a preferred application. The main problem seen in the shaping process performed using molds belonging to sheet metal sheets is back springing. When we look at the springbacks created by using the V bending process, it is determined that the graphs showing the amount of springback at different angles are missing in materials with different thicknesses. In order to determine the amount of back spring formed during the studies, the V bending mold and S355JR (ST52) sheet metal plate were processed as experimental material. The experiments were carried out using mold angles of 60, 90 and 120 degrees for 2 and 3 mm thick specimens and bending radii of 2 mm and 4 mm for each angle machined. After the experiments, a digital measuring device was used to determine the amount of springback of the sample products. Comparisons of the experimental results obtained from the experiments were made according to certain parameters. As a result of the experiments, springback was observed in the S355JR (ST52) sheet metal. It has been observed that the springback decreases as the bending mold angle increases. It was determined that the amount of springback decreased with the increase of the sheet metal thickness, and the springback increased as the bending radius increased. Two situations have been observed. First observation; As the sheet metal thickness increases, the amount of springback decreases. Second observation; The higher the bending radius, the greater the springback.

\*İlgili Yazar, email: gbasmaci@mehmetakif.edu.tr

## 1. Giriş

Sanayi sektöründe kendisine pek çok alanda kullanım bulan sac levhalar, karbon oranı yüksek elementlerden elde edilirler. Düzgün bir yüzeye sahip olup pürüzsüzdür. Yassı veya rulo halde bulunan sac levha malzemeler kullanım yerine göre çeşitli kalınlıklarda ve ebatlarda olabilirler. Haddelenmiş ürünlerin arasında yer alıp ve geniş alanlarda tercih edilirler. Levha sac üretimde daha kolay imalatı olduğundan dolayı ayrıca kullanım rahatlığı ve mukavemeti ile endüstriyel farklı kullanım alanlarına sahipler. Sac metaller endüstriyel ürünler, otomotiv, mutfak eşyaları, elektronik parçalar, savunma sanayi, havacılık sanayisinde vb. yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sac metallerin günümüzde farklı işleme yöntemleri mevcuttur. Endüstriyel de sac levhalar çoğunlukla büküm kalıpcılığı ile hammadde, yarı mamul hale getirilir. Endüstriyel kalıpcılığın uygulama alanlardan biriside büküm kalıpcılığıdır. Sac metal levhaların kalıpla şekil verilmesi esnasında geri yaylanma karşılaşılan sorunlardan birisidir. Büküm işlemi esnasında malzemenin davranışında değişiklikler meydana gelebilmektedir. Malzeme üstünden büküm kuvveti geri alındığı zaman, sac metal levha bir miktar şekil değişmesi ve eski haline geri dönme olayına geri yaylanma olarak bilinmektedir.

Forcellese vd. 1998 [5] yılında yapmış olduğu çalışmada, büküm kuvveti V büküm metodunda geri yaylanmaya tesirleri incelemişlerdir. Çalışmalarda; büküm kuvveti yanında, büküm radyüsü ve geri yaylanmaya olan etkileri gözlemlemişlerdir. Büküm radyüsü arttığında geri yaylanmanın yükseldiği, düşük olması durumun da ise geri yaylanmanın düştüğü tespit edildiği belirtilmiştir.

Chan vd. 2004 [4] yılında yapmış olduğu, V büküm kalıbıyla yaptıkları deneylerde geri yaylanmanın tesirlerini incelemişlerdir. Alüminyum AL2024-T3 sac metal levha malzemesini kullanarak, değişik kalıp açılarında ve büküm radyüsleri üzerinde çalışmaları incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmalarında Abaqüs ve Patran yazılımlarını kullanarak sonuçları daha efektif hale getirmişlerdir. Sonlu elemanların analiz verilerine göre, büküm radyüsünün düşmesi ve kalıp açısının ise yükselmesiyle geri esneme miktarının düştüğünü incelemişlerdir.

Panthi vd. 2007 [11] yılında yapılan çalışmada oluşan büküm kuvvetinin geri yaylanma üzerinde görülen etkisini analiz çalışmalarıyla elde etmişlerdir. Seçilen malzemeye en düşük büküm kuvveti yapıldığında oluşan geri yaylanma değerinin büyük olduğu ve büküm kuvvetinin yükselmesi durumunda oluşan geri yaylanma miktarının gözle görülür bir şekilde azaldığı gözlemlemişlerdir.

Sarıkaya tarafından 2008 [12] yılında yaptığı çalışmalarında, ısıl işlemi kullanmış olup değişik kalınlıklarda olan alüminyumdan oluşan malzemelere birbirinden farklı üç kalıp açısı ve üç farklı kalıp değişkenleri kullanılarak büküm çalışması realize edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda von mises gerilme değişimleri, plastik gerilme değerlerinin, kalıp kuvvetlerinin geri esneme düzenine etkilerini sonlu elemanlar analizi yönteminde faydalanarak iki şekilde olan teorik ve deneysel olarak tetkik edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda alüminyumdan yapılmış olan malzemelerde ileri yaylanma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca deney sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda seçilen kalınlık değeri artırıldığında geri yaylanma değerinin de minimuma yaklaştığı saptanmıştır.

Bakhshi-Jooybari vd. 2008 [2] yılında yaptıkları çalışmada, CK67 sac metal levhayla birlikte V- büküm işlemleri 3 farklı değerdeki kalınlık, 4 farklı büküm radyüs olacak şekilde kullanmış olup 60°lik kalıpta deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonunda ise sac levha numunelerinde ileri yaylanmanın gerçekleştiği sonucuna karar vermişlerdir. Büküm radyüsünün miktarının artması ise geri yaylanma değerinin artış gösterdiği tespit etmişler.

Tekaslan vd. 2008 [15] yılında yaptıkları çalışmada, hadde yönüne değerlendirildiğinde malzemelerde seçilen birbirinden farklı altı açılarda bükümleme işlemi sonucunda görülen geri yaylanma değerinin tespit etmek istemişlerdir. 25x50 mm ebatları olan farklı kalınlıkları olan 3 adet Bakır sac kullanılmışlardır. Yapılan çalışmada farklı olarak 4 metotta yer alan kullanılan birinci ve ikinci metotlarda oluşan geri yaylanma değerini tespit etmede elverişli olduğu kanısına saptanmıştır. Üst kalıp yükünün Bakır sac üzerinde bekletilmesi sonucunda büküm zaman değerinin arttırılmasına karşı geri yaylanma değerinde azalma görüldüğü tespit etmişlerdir. 20-25 sn. bekleme süresi ile ortalama 1-3° değerler aralığında geri yaylanma değerinde azalış incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre kalınlık değeri ile seçilen bükme açısının geri yaylanma üzerine doğru orantıda etkilediğine karar vermişlerdir.

Özer tarafından 2011 [10] yılında yaptığı çalışmalarında, yüksek mukavemete sahip çeliklere yapılan işlem adı olan şekil verme sonrasında gözlemlenen geri yaylanma değerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çıkarım



yapılması ve düzeltilmesi üzerine çalışmıştır. Birbirinden farklı 3 büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Hill48 ve Barlat89 akma modellerinin yer aldığı çalışmada sonlu elemanlar analizlerini tespit etmiştir. DP, TRIP ve TWIP 3 farklı çeliklerin geri yaylanma özellikleri incelenerek, pekleşme katsayısı ve pekleşme üstelinin geri yaylanma üzerinde tesirleri olup olmadığı incelenmiştir. U- profil büküm işlemi sonrasında benzer olmayan malzemeleri birbirleriyle karşılaştırmış ve olanların arasında bulunan anizotropi ve plastik davranışını en doğru sergileyen modelin Barlat89 olduğu tespit edilmiştir. S-ray profil büküm işlemi sonucunda, Barlat89 modeliyle yapılan deneylere göre çok fazla geri yaylanma tespit edilmiştir. Kalıp boşluk değerinin artması sonucunda geri yaylanma değerinin artış gösterdiği sürtünme katsayısı ve baskı plakası kuvvet miktar değerleri yükseldikçe de geri yaylanma değerinin azalış gösterdiği sac kalınlığının artmasından dolayı geri yaylanma miktarının arttığı sonuçlarına varılmıştır.

Ötü tarafından 2012 [8] yılında yaptığı çalışmalarında, V büküm kalıplarında ise yer alan değişik büküm işlemleri kullanarak AA 5754-O ve AL 1050-O sac malzemelerinde oluşan geri yaylanma miktarlarını değerlendirilmiştir. Yapılan deneyde ise deneysel ve teorik yöntemleri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Aynı olmayan iki kalınlığı bulunan malzemeleri 3 tane olmak üzere farklı açılar kullanarak V büküm kalıplarında, haddeleme yönü doğrultusunda 0°, 45° ve 90° olacak şekilde çalışmalar yapmıştır. Üst kalıp sac levhanın üzerinde gerçekleştirilen oyalanma süresi sonucunda geri yaylanma miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan sac malzemelerinde hadde yönü özelliğinden dolayı geri yaylanma miktarlarında farklılıklar oluşturduğu tespit edilmiştir.

Şahin tarafından 2013 [14] yılında yaptığı çalışmalarında, geri yaylanma davranışları tespit edebilmek için, yöntem olarak V büküm kullanarak deneysel ve Dynaform yazılımı aracılığıyla teorik açıdan incelemiştir. Kalıp değişken çeşitlerine göre paslanmaz, dkp, alüminyum malzemelerine göre çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kalıp değişkeninde farklı olarak üç V kalıp açıları kullanılmakta olup ve büküm radyüs değerinin sabit değer olarak ele almıştır. Üç farklı kalınlığı olan örnekler kullanılmış ve elde edilen sayısal sonuçlarıyla birlikte deneysel sonuçları karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçları yaptığı inceleme sonucunda birbirlerine eşit değerler olduğunu tespit etmiştir. Bazı deney göstergelerinde yer alan geri yaylanmanın yanında ileri yaylanma değerinin sonuçları tespit edilmiştir.

Aslan tarafından 2014 [1] yılında yaptığı çalışmalarında, yöntem olan V büküm ise sıvı basıncıya birlikte deneysel olarak araştırma yapmıştır. Kalınlığı 0,5 mm olarak belirlenen alüminyumdan oluşan, Bakır ve pirinç malzemelerini ise değişik açılar kullanarak V büküm kalıplarında çalışmalarını noktalamışlardır. Büküm sıvı basıncı miktarı ve ütüleme süresindeki gözlemlenen artış miktarının geri yaylanma değerinin azalttığını, büküm açısı ile malzemede olan sertliğin artması da geri yaylanma miktarının arttırdığını elde etmiştir.

Özdemir tarafından 2015 [9] yılında yaptığı çalışmalarında, V dip büküm çalışması bulgusunda yer alan ileri ve geri yaylanma davranışları, normalizasyon ve ısıl işleminde yer alan 16Mo3 oluşan sac malzemelere olan etkisi küçük yapısal düzeyde çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre 30° gerçekleştirilen büküm işleminde, ısıl işlemi olmadan ve normalizasyon işlemi yapılan sac malzemelerin kalınlık değerleri artırıldıkça, ileri yaylanma miktarını artış gösterirken, 60° ve 90° açılarla gerçekleştirilen işlem olan bükümde sac malzeme kalınlık miktarını arttırıldıkça elde edilen ileri yaylanma miktarının azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Menevişleme işlemi yapılmamış elemanlarda ise, sacların kalınlık miktarını arttırdıkça geri yaylanma değerinin azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Isıl işlemi olmadan ve normalizasyon işlemi yapılmış malzemelerde üst kalıp büküm radyüsü miktarını arttırıldıkça ileri yaylanma sayısal değerini azaltırken, ısıl işlemi uygulanmış malzemelerde ise, geri yaylanma davranış değerinin arttığını tespit etmişlerdir.

Sayın tarafından 2019 [13] yılında yapmış olduğu çalışmasında farklı sac levha malzemelerin farklı kalınlıkları da geri yaylanmasını incelemiştir. Bu çalışmada geri yaylanma miktarlarını incelemek için V büküm kalıpları malzemelere olarak da AISI 304, EN 10130 DC01, Bakır sac metal levhalar kullanılmıştır. Deneyde kullanılan malzemelere göre geri yaylanma farklılık gösterdiği gözlemlenmiş olup akma mukavemeti yüksek olan malzemede daha fazla geri yaylanma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça da geri yaylanmanın azaldığı gözlemlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada V büküm kalıp tasarlanarak yapılan S355JR (ST52) sac levhaları, 2 ve 3 mm kalınlıklarında, 2 ve 4 mm büküm radyüsünde geri esneme davranış araştırmaları yapılmıştır. Yapılan deney çalışmalarda bulgular ve sonuçlar grafik ve tablolar halinde kıyaslanmıştır. Sac metal levhalarda V büküm işlemi esnasında kullanılacak deney malzemeleri geri yaylanmayı etkileyen parametreler kalıp malzemelerin açıları Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** İşlem parametreleri

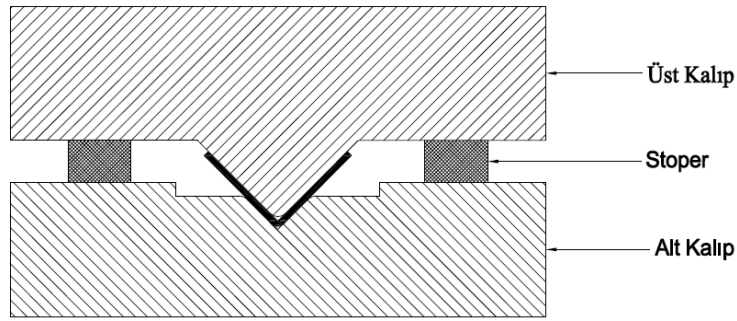
Malzeme	S355JR (ST52)
Kalıp Açısı (°)	60,90,120
Malzeme kalınlığı (mm)	2,3
Bükme radyüsü (mm)	2,4

Deneylerde kullanılacak sac metal levhaların boyutları belirlenmiş olup Lazer makine tezgâhında işlem yapılmıştır. 100 tonluk atölye modeli hidrolik pres aracıyla V büküm deneyi her parametreler için 3 er defa tekrarlanarak toplamda 36 adet numune büküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyde üst kalıp malzeme üstünde 3 saniye bekletilmiştir. Büküm işlemi uygulanırken sac metal levha fazla yük ile deforme olmaması için alt kalıp ve üst kalıp arasına stoperler konulmuştur. Kullanılan stoper kalınlıkları Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.2.** İşlem parametrelerine göre stoper kalınlığı

Kalıp açısı (°)	Malzeme kalınlığı (mm)	Stoper kalınlığı (mm)
60	2	11,3
	3	12,3
90	2	14,9
	3	15,9
120	2	10
	3	11

Deneyde kullanılan kalıpların ve stoperlerin şematik gösterimi şekil 2.1'de örnek olarak verilmiştir.

**Şekil 2.1.** 60° V bükme kalıbı stoper gösterimi

## 2.1. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri

V büküm deneyinde kullanılan 75x50 mm boyutlarında 2 ve 3 mm kalınlığındaki S355JR (ST52) sac metal levhaları kullanılmıştır. Deney numunelerinin kimyasal özellikleri Tablo 2.3'de; mekanik özellikleri ise de Tablo 2.4' de gösterilmiştir.

**Tablo 2.3.** S355JR (ST52) sac malzemesinin kimyasal özellikleri

Sınıf	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
S355JR (ST52)	0,057	1,064	0,029	0,006	0,467	18,09	8,05	0,206	0,14

**Tablo 2.4.** S355JR (ST52) sac malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (% in 50 mm) min
S355JR (ST52)	218-279	319-352	28,7-39,2

Deney kalıp malzemeleri, CK 45 imalat çeliği seçilerek CNC dik işlem makinesinde hassas bir biçimde işlenerek üretilmiştir. Kalıp malzemelerde darbeden dolayı çatlama, kırılma ve malzemenin içyapısında bozulmaması için ısıtma işlemi uygulanmıştır. Deney örnekleri hassas bir şekilde alınabilmesi için Lazer makine yardımıyla 75x50 mm ölçülerinde kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 2.2'de deneylerde kullanılan örnekler verilmiştir. Büküm kuvvet hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$P_k = \frac{c \cdot \sigma_b \cdot s^2 \cdot b}{W} \quad (1)$$

$$c = 1 + \frac{4 \cdot s}{W} \quad (2)$$

$$P_e = 2 \cdot P_b \quad (3)$$

Burada;

$P_e$  = Son Büküm Kuvveti (N)

$\sigma_b$  = Çekme mukavemeti (N/mm<sup>2</sup>)

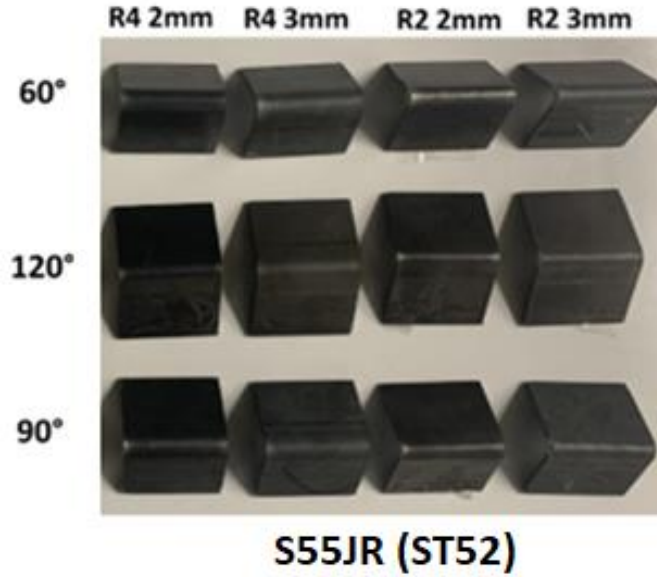
c = Büküm kuvveti katsayısı

W = Kalıp açıklığı (mm)

$P_k$  = Büküm kuvveti (N)

s = Sac levha kalınlığı (mm)

b = Levha genişliği (mm)



Şekil 2.2. Deney numunesi

### 3. Bulgular

Deneyde kullanılan kalıplar 60°, 90°, 120° açılarda 2 ve 4 mm büküm radyüslü kalıplarla 2 ve 3 mm kalınlığında S355JR (ST52) sac metal levha kullanılarak yapılmıştır. Her büküm deney örnekleri için 3'er adet olacak biçimde toplamda 36 adet numune bükülmüştür.

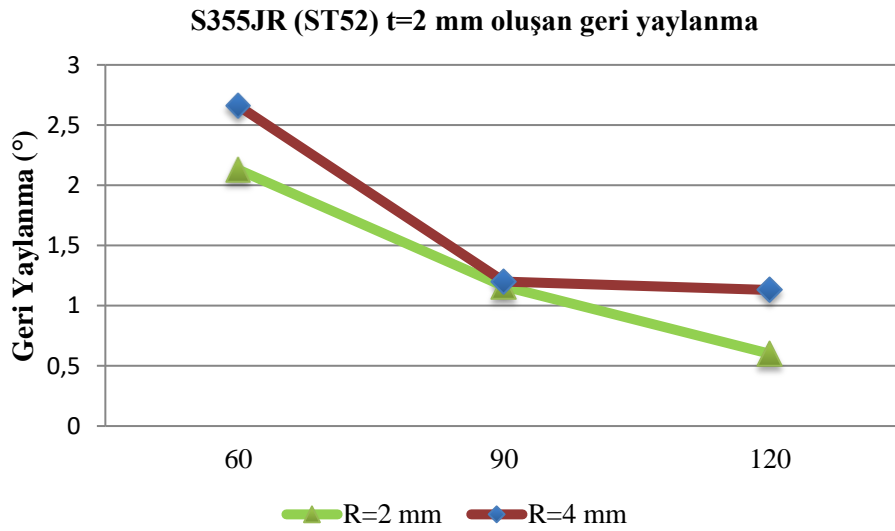
Tablo 3.1'de Hidrolik pres makinesinde gerçekleştirilen deneyler, S355JR (ST52) levhaya ait deneysel geri yaylanma sonuçları açı değerleri ile verilmiştir. Deney sonuçları tablo 3.1'de verilmiştir. Hidrolik preste bükülen deney örnekleri dijital açı ölçer kullanılarak veriler ölçülmüştür. S355JR (ST52) 2 mm sac levhaya ait geri yaylanma verilerin grafik Şekil 3.1'de gösterilmiştir. S355JR (ST52) 3 mm sac levha için ise Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1. S355JR (ST52) sac levha deneysel geri yaylanma sonuçları

Kalıp Açısı (°)	Sac Kalınlığı(mm)	Büküm Radyüsü(mm)	Geri Yaylanma (°)
60	2	2	2,13
		4	2,66
	3	2	0,23

		4	1,1
90	2	2	1,16
		4	1,2
	3	2	0,5
		4	1,8
120	2	2	0,6
		4	1,13
	3	2	0,35
		4	0,6

Tablo 3.1'de genellikle deney sonuçlarında ve bütün değerlerde bulunan geri esneme miktarları ortalama değerlere yakın ve geri esneme açı değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu gözükmemektedir. Tablo (3.1.)'de en yüksek geri yaylanma 60° büküm açısı 2 mm kalınlık, 4 mm radyüslü kalıptaki S355JR (ST52) sac levhalarının bükülmesi ile elde edildiği gözlemlenmiştir. En az geri yaylanma ise 120° büküm açısı 3mm kalınlık, 2 mm radyüslü kalıptaki S355JR (ST52) sac levhanın bükülmesi sonucunda gözükmemektedir.



**Şekil 3.1.** 2 mm kalınlığının S355JR (ST52) sac levhanın kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği

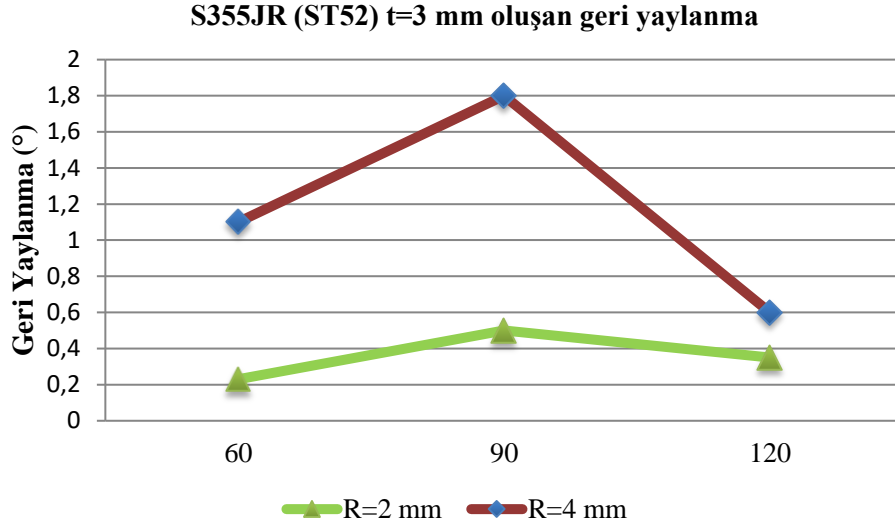
Yukarıda belirtilen Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 2 mm kalınlığına sahip ST52 sac levha için belirlenen geri yaylanma değeri 120° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir. ST52 sac levhanın maksimum geri yaylanma değerini ise 90° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir.

Büküm açısı 60° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, büküm radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %24,8 değerinde arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsü 4 mm olan değerde (2,66°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 90° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %0,35 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 4 mm olan değerde (1,2°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 120° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %88,3 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 4 mm olan değerde (1,13°) olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde oluşan sonuçlara göre bükme açısı 90° olan kalıplarda 2 mm ST52 sac levhanın bükülmesiyle gerçekleşen büküm radyüsünün oluşturduğu geri yaylanma üzerindeki bıraktığı etkinin diğer kalıp açılara göre en az olduğu tespit edilirken, büküm açısı 120° olan kalıplarda ise bu farkın maksimum çıktığı gözlemlenmektedir.



**Şekil 3.2.** 3 mm kalınlığının S355JR (ST52) sac levhanının kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği

Yukarıda belirtilen Şekil 3.2’de görüldüğü üzere 3 mm kalınlığına sahip ST52 sac levha için belirlenen en az geri yaylanma değeri 60° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir. ST52 sac levhanının en fazla geri yaylanma değerini ise 90° büküm açısına ait olan kalıptan erişilmiştir.

Büküm açısı 60° olan kalıpta, büküm radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %79,1 değerinde arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsü 2 mm olan değerde (0,23°) olduğu tespit edilmiştir.

Büküm açısı 90° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri yaylanmaya miktarı %72,2 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 2 mm olan değerde (1,8°) olduğu tespit edilmiştir.

Bükme açısı 120° olan kalıpta, bükme radyüsleri 4 mm olarak yapılan büküm işlemleri sonucunda görülen geri yaylanma miktarı, bükme radyüsü 2 mm olana göre geri esneme miktarı %41,6 arttığı ve oluşan geri yaylanma değerinin ise en az bükme radyüsünde 2 mm olan değerde (0,35°) olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde oluşan sonuçlara göre büküm açısı 60° olan kalıplarda 2 mm ST52 sac levhanının bükülmesiyle gerçekleşen bükme radyüsünün oluşturduğu geri yaylanma üzerindeki bıraktığı etkinin kalıp açılarına göre en az olduğu tespit edilirken, büküm açısı 90° olan kalıplarda ise bu farkın en yüksek çıktığı gözlemlenmektedir.

ST52 sac levhalarına ait kalınlıkların, belirlenen kalıp açılarına göre değerlendirme işlemi sonrasında 2 mm kalınlığı bulunan sac levhadaki kalıp açısı derecesi arttırıldıkça oluşan geri yaylanma miktarının düştüğü, 3 mm kalınlıktaki sac levhada ise kalıp açısı arttırıldıkça oluşan geri yaylanma değerinin arttığı gözlemlenmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan deneylerde elde edilen veriler grafikler halinde incelendiğinde malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanmanın azaldığı el edilmiştir. En yüksek geri yaylanma değeri 2 mm sac kalınlığında gözlemlenirken en az geri yaylanma miktarı da 3 mm sac kalınlığında olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen değerler ile literatür taramasındaki sonuçlar ile örtüşmektedir. Malzeme kalınlığı artmasıyla geri yaylanmanın azalmanın sebebi bükme işlemi sonrasındaki uç radyüsünde oluşan gerilme miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır [7].

Kalıp açılarının artması ile geri yaylanmanın azalmasının sebebi ise bükme açısının yükselmesi ile sac levhanının dış yüzeyindeki uzama miktarının artması ile oluşmaktadır [6]. Büküm radyüsüne bakıldığında 2 mm büküm radyüsü kalıpta elde edilen geri esneme miktarı ile 4 mm büküm radyüslü kalıplarda daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Büküm radyüsü düşük olan kalıplarda geri yaylanma miktarı daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kalıplardaki büküm radyüsü geri yaylanmada önemli bir etkisinden biridir. Bir diğer etkende malzemenin plastik bölgesine bağlıdır. Düşük büküm radyüsü, kuvveti daha yüksek plastik deformasyona ve düşük bölgesel gerinim seviyesi gerektiren ince bir alanda yoğunlaşmaktadır. Bu sebeplerden ötürü geri yaylanma miktarının artmasına neden olmaktadır [3].

- S355JR (ST52) sac metal levhanın düşük akma mukavemetinde olduğu için geri esneme miktarı az olduğu belirlenmiştir.
- S355JR (ST52), sac metal levhaların kalınlıkları artmasıyla geri esneme değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu olayın sebebi ise büküm bölgesindeki meydana gelen kalıntı gerilme değerinin düşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.
- V büküm deney kalıp açısının yükselmesi 2 mm S355JR (ST52) sac metal levhalarda geri yaylanma değerinin düştüğü belirlenmiştir. Genel olarak kalıp açılarının yükselmesi ile geri yaylanma değerinin düştüğü sac metal levhaların bükme işlemi sonrasında dış yüzeyindeki uzamanın düşmesinden kaynaklandığı söylenebilir.
- Yapılan deneyde kullanılan 2 mm büküm radyüsüne sahip kalıplardan elde edilen geri esneme miktarının 4 mm büküm radyüsüne göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

### Teşekkür

Yapılan deneysel çalışma 0829-YL-22 proje kodu ile Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafınca desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Aslan, Y. (2014). *Sıvı Basıncıyla V Bükme Prosesinde Geri Esnemenin Deneysel Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [2] Bakhshi, J. M., Rahmani B., Daezadeh V., ve Gorji A. (2008). The Study of Spring-back of CK67 Steel Sheet in V-Die and U-Die Bending Processes, *Materials and Design*, Faculty of Mechanical Engineering Babol University of Technology, Mazandaran, Iran, 30, 2410-2419.
- [3] Buang, MS., Abdullah, SA., ve Saedon, J. (2015). *Effect of Die and Punch Radius on Springback of Stainless Steel Sheet Metal in The Air V-Die Bending Process*, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 8, 1322-1331.
- [4] Chan, W. M., Chew, H. I., Lee, H. P., ve Cheok, B. T. (2004). *Finite Element Analysis of Spring-Back of V-Bending Sheet Metal Forming Processes*, Journal of Materials Processing Technology, 148, 15-24.
- [5] Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., ve Micari, F. (1998). *The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes*, Journal of Materials Processing Technology, 80-81, 108-112.
- [6] Leu, D. K. (1997). *A Simplified Approach For Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals*, Journal of Materials Processing Technology, 66, 9-17.
- [7] Livatyalı, H., ve Altan, T. (2001). *Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging Using Computer Aided Design Methods*, Journal of Materials Processing Technology, 117, 262-268.
- [8] Ötü, R. (2012). *V Bükme Kalıplarında Alüminyum Alaşımli Sacların Şekillendirilmesi ve Geri Esneme Miktarlarının Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye.
- [9] Özdemir, M. (2015). *Sac Malzemenin Geri-İleri Esneme Miktarı ve Deformasyon İlişkisinin Deneysel ve Matematiksel Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [10] Özer, F. (2011). *Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucu Oluşan Geri Yaylanmanın Doğru Tahmini ve Telifisi*, Yüksek Lisans Tezi. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [11] Panthi, S. K., ve Ramakrishnan N. (2007). *An Analysis of Springback in Sheet Metal Bending Using Finite Element Method (FEM)*, Journal of Materials Processing Technology, 180, 80-85.
- [12] Sarıkaya, O. T. (2008). *Analysis of Heat Treatment Effect on Springback in V- Bending*, Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [13] Sayın, L. (2019). *AISI 304, EN 10130 DC01, Bakır Sac Levhaların V bükme Yöntemi ile Şekillendirme Sonucunda Oluşan Geri Yaylanma Miktarının Deneysel Olarak İncelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi). Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, Türkiye.

- [14] Şahin, Ç. Ö. (2013). *Sac Levhaların V-Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [15] Tekaslan, Ö., Nedim, G., ve Şeker, U. (2008). *V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti*, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, Cilt 23, No 1, 231-238.

## ERUBABYFACED: Yeni Bir Bebek Yüz Tanıma Veri Seti ve Derin Öğrenme ile Tespit ve Tanınması

Tayyip Özcan\*<sup>1</sup>, Beyza Nur Aydemir<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, KAYSERİ

(Alınış / Received: 18.07.2023, Kabul / Accepted: 19.10.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Derin öğrenme,  
Yüz tespit,  
Yüz tanıma,  
Bebek tanıma,  
TensorFlow Lite,  
ERUBABYFACED

**Öz:** Yüz tanıma, bir kişinin yüz biyometrik verisini kullanarak kişinin tanınmasını sağlayan sistemdir. Yüz tespiti ve tanıma, günümüzde yapay zeka, görüntü işleme ve bilgisayarlı görü gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yeni doğan bebeklerde ise yüz tanıma sistemi zorlu bir süreç gerektirmektedir. Araştırmacılar son yıllarda yüz tespit ve tanıma üzerine çokça araştırmalar yapmıştır. Evrişimli sinir ağları (CNN), yüz tanıma çalışmalarında en sık kullanılan yöntemler arasında yerini almıştır. Her ne kadar yüz tanıma üzerine kamuya açık çokça yetişkin yüzlerinden oluşan veri seti bulunsun da bebek yüzlerinden oluşan veri setine ulaşmak oldukça zordur. Bu yüzden bu çalışmada ilk olarak 10 bebeğe ait toplamda 128 imge içeren ERUBABYFACED adında yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada CNN yöntemi kullanarak bebeklerde yüz tespit ve tanıma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. ERUBABYFACED veri seti deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Etiketlenen veriler, TensorFlow kütüphanesi tabanlı TensorFlow Lite modeli elde edilecek şekilde eğitilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda %95'e kadar başarı oranı elde edilmiştir.

## ERUBABYFACED: A New Baby Face Recognition Dataset and Its Detection and Recognition using Deep Learning

### Keywords

Deep learning,  
Face detection,  
Face recognition,  
Baby recognition,  
TensorFlow Lite,  
ERUBABYFACED

**Abstract:** Face recognition is a system that enables a person to be identified using facial biometric data. Face detection and recognition are used in fields such as artificial intelligence, image processing and computer vision. In newborn babies, the face recognition system requires a challenging process. Researchers have done a lot of research on face detection and recognition in recent years. Convolutional neural networks (CNN) have taken their place among the most frequently used methods in face recognition studies. Although there is a large publicly available dataset of adult faces on face recognition, it is very difficult to reach the dataset of baby faces. Therefore, in this study, firstly, a new dataset called ERUBABYFACED, which contains 128 images of 10 babies, was created. In this paper, face detection and recognition works were carried out in infants using the CNN method. The ERUBABYFACED dataset was used in experimental studies. The labeled data is trained to obtain a TensorFlow Lite model based on the TensorFlow library. As a result of experimental studies, a success rate of up to 95% was obtained.

\*İlgili Yazar, email: tozcan@erciyes.edu.tr

### 1. Giriş

Yüz tespiti, bir görüntüde yer alan yüzlerin bölgelerinin bulunmasıdır. Tespit edilen yüzlerden özellikler çıkarılarak kimliklendirilmesi ve sınıflandırılması işlemi ise yüz tanımadır [1]. Yüz tanıma, güvenlik ve erişim



kontrolü, sınır kontrolü, suç önleme ve soruşturma, eğitim ve devamsızlık takibi ile mobil cihaz ve kişisel güvenlik alanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [2].

Yüz tanıma, araştırmacıların yoğun olarak üzerinde çalıştığı bir konudur. Üzerinde çalışılan en yaygın algoritmalar: Eigenfaces, Fisherfaces, Local Binary Patterns ve Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) [3] olarak sıralanabilir. Yüz görüntülerinin birden fazla dalga boyunda elde edilmesi ve bu görüntülerin birleştirilmesi, çoklu spektral görüntüleme veya çoklu dalga boyunda görüntü işleme olarak adlandırılan bir teknikle gerçekleştirilebilir. Bu teknik, yüz analizi ve tanıma gibi çeşitli uygulamalarda kullanışlı olabilir.

Gelişen teknoloji ile büyük verileri işleme olanağı arttığından, CNN tabanlı yöntemler son yılların popüler algoritma seçimi haline gelmiştir. CNN tabanlı yüz tanıma sistemleri büyük verilerle derin öğrenmeye dayalı olarak çalışmaktadır. Birçok evrişim ve tam bağlantılı katmana sahip olan CNN, yüz imgelerini işleyerek, bu imgelerden özellikler çıkarır ve yüz tanıma işlemini gerçekleştirir. CNN tabanlı yöntemlerle yüksek doğruluk oranında başarılı sonuçlar elde edilmektedir [4].

CNN gibi derin öğrenme modellerini uygulamak için bazı kütüphaneler geliştirilmiştir. Bunlardan birisi TensorFlow'dur [5]. Bu kütüphane, CNN'ler için geliştirilmiş birçok araç ve özellikler sunmaktadır. Model eğitiminden sonuçların gösterilmesine kadar katkı sağlar. Keras API'si ile birlikte sinir ağları oluşturmayı, eğitmeyi ve değerlendirmeyi kolaylaştırır. Hesaplamaların verimliliğini artırmak için işlem optimizasyonu, otomatik diferansiyon ve GPU hızlandırması gibi yöntemleri kullanır. Ön eğitilmiş CNN modelleri sunmaktadır. Bu modeller kullanılarak daha basit ve etkili yöntemler ortaya çıkarılmaktadır. Ortaya çıkarılan bu yöntemlerle büyük ölçekli veri setleri üzerinde görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve takibi gibi görevler gerçekleştirilmektedir.

TensorFlow Lite [6], mobil ve gömülü sistemlerde kullanılmak üzere, TensorFlow modellerini hafifletmek için geliştirilen bir TensorFlow kütüphanesidir. Bu kütüphane ile yapay zeka modellerinin mobil uygulamalarda entegrasyonu kolaylaşmakta, düşük güç tüketimi, hızlı performans ve yerel cihazlarda çalışabilirlik özellikleri kazanılmaktadır. Transfer öğrenme ile daha verimli ve hızlı bir biçimde yeni görevlere adapte olabilen ön eğitilmiş modelleri desteklemektedir.

Mobil ve IoT sistemlerinde kullanılabilecek TensorFlow Lite modelleri için yapılan bazı literatür çalışmaları aşağıda sunulduğu gibidir:

Fadlilah ve arkadaşları [7] duyma engelli insanlar ile iletişimi kolaylaştırmak için android cep telefonlarında kullanılmak üzere BisAndro öğrenme uygulaması üzerine çalışmışlardır. Her ülkenin kendi işaret dili bulunmasının yanı sıra Endonezya'da SIBI ve BISINDO olmak üzere 2 tür işaret dili bulunmaktadır. Ancak BISINDO, SIBI gibi resmi bir işaret dili değildir. Fadlilah ve arkadaşları [7] tarafından BISINDO dilini de yaygınlaştırmak amacıyla android uygulaması geliştirme ihtiyacı duymuştur. İlgili çalışmada CNN ve Tensorflow Lite kütüphanesi kullanılması kararlaştırılmıştır. Zeroual ve ekibi [8] tarafından mobil bulut ortamında derin sinir ağı ile ince ayar yöntemi kullanılarak yüz tanıma için model önerilmiştir. Mobil telefonlarını kullanan kişilerin artması ile birlikte güvenliğin mobil bulutta zorlu hale geldiğini düşündükleri için bu yöntemi önermişlerdir. Bulut veya hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duymadan mobilde tanıma yapmak amaçlanmaktadır. Çalışmada mobil için Tensorflow Lite derin öğrenme kütüphanesi kullanılmıştır. Daha öncesinde Python Keras kütüphanesi kullanılarak elde edilen %99,50 doğruluk oranı Tensorflow Lite derin öğrenme kütüphanesi kullanılarak %100'e ulaşmıştır. Alsing [9] algılanacak nesnelere özelliklerinden bağımsız olarak görüntülerdeki nesnelere algılamak için karmaşık makine öğrenimi modelleri oluşturmaktadır. Alsing mobil cihazlarda gerçek zamanlı video akışlarında nesne algılama için derin öğrenme modelleri kullanmanın uygulanabilirliğini, nesne algılama performansı ve çıkarım gecikmesi açısından uçtan uca bir sistem veya mevcut algoritmalar için özellik çıkarma üzerine çalışmıştır [9]. Mobil cihazlarda kullanım için Post-it notu nesne algılayıcı CNN'i oluşturmaya yönelik bir yaklaşım ortaya koymuştur. Çoklu tabanlı modeller ve nesne algılama çerçeveleri kullanarak, bir android uygulamasındaki notların gerçek zamanlı olarak algılanması için çeşitli modelleri başarılı bir şekilde eğitmiş ve uygulamıştır. Abed ve arkadaşları [10] Covid-19'un yaşamın birçok alanında aksamalara ve salgının etkisini azaltmak için de yüz maskesi takılarak salgının kontrol altına alınmasının gerektiğini düşünerek manuel olarak maske kontrolü yapılması yerine otomatik maske kontrolünün yapılabileceği bir sistem önermişlerdir. Önerilen sistem gerçek zamanlı gözetim canlı kızılötesi (IR) kameralı derin öğrenme platformlarına dayalı bir sistemdir. Sistemde YOLOv3 ve Tensorflow Lite isimli nesne algılama platformları kullanılmıştır. İki model, maskeli ve maskesiz kişilerin görüntülerinden oluşan bir veri seti ile eğitilmiş olup ilgili çalışma Google Colab ile simüle edilmiştir ve ardından Raspberry Pi 4 model B, 8 GB RAM adlı hızlı GPU ile eşleştirilmiş gömülü bir cihazda gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Kesinlik oranı ve işlem süresine bağlı olarak performanslarını doğrulamak için iki model arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç olarak sistem yüksek çıkarım hızıyla tek bir sahnede 10 adede kadar yüz maskesini gerçek zamanlı olarak algılamayı da başarmıştır. Görme engellilerin android tabanlı bir cep

telefonunda kullanması için çevrelerindeki nesnelere algılayarak nesnelere çarpmadan hareket etmelerini sağlayacak bir sistem Aralıkatti ve arkadaşları [11] tarafından önerilmiştir. Sistemde nesnelere tespit, cep telefonu kamerasından çekilen gerçek zamanlı bir videodan yapılmaktadır. OpenCV, YOLO ve FaceNet kullanılarak videodan insanlar ve nesnelere tespit edilmektedir. Bir insan algılandığında sistem kişiyi tanımlamaktadır. Tespit edilen insanlar ve nesnelere kullanıcıya ses formatında sunulmaktadır.

Bebek yüz tanıma süreci, erişkin insanların yüz tanıma sürecine göre oldukça zorlu aşamalar gerektirmektedir. Ayrıca bebek yüz tanıma üzerine kamuya açık veri seti bulmak oldukça güçtür. Bu nedenle etik kurul izin belgesi alınarak bu çalışma için yeni bir bebek yüz veri seti oluşturulmuştur. ERUBABYFACED isimli yeni veri seti, 10 farklı bebeğe ait toplamda 128 görüntüden oluşmaktadır.

Bu çalışmada TensorFlow Lite kütüphanesi ile ERUBABYFACED veri seti kullanılarak mobil ve IoT cihazlar için bebek yüz tespit ve tanıma modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda %95'e kadar doğruluk oranı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ana katkıları şu şekildedir:

- ERUBABYFACED isimli yeni bir bebek yüz tanıma veri seti oluşturulmuştur.
- TensorFlow Lite kütüphanesi ile CNN tabanlı bebek yüz tespit ve tanıma modeli geliştirilmiştir.
- Mobil ve IoT cihazlar için Tflite modeli oluşturulmuştur.

Makalenin bundan sonraki bölümleri için; oluşturulan ERUBABYFACED veri seti ve geliştirilen TensorFlow Lite modeli Bölüm 2 ile, deneysel sonuçlar Bölüm 3 ile ve genel değerlendirme Bölüm 4 ile detaylı olarak sunulacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışma için bebek yüzlerinden yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan ERUBABYFACED veri seti, etiketleme süreci ve geliştirilen TensorFlow Lite modeline ait detaylı bilgi alt bölümlerde sunulmuştur.

### 2.1. ERUBABYFACED Veri seti

Yapılan detaylı araştırma sonucunda bebeklere ait yüz görüntülerini içeren kamuya açık hazır bir veri seti bulmak oldukça güçtür. Bu sebeple ebeveynlerin izinleri doğrultusunda bebeklere ait yüz görüntülerinin bulunduğu 10 bebeğe ait toplamda 128 görselin bulunduğu yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Veri setinde yer alan fotoğraflar genellikle yeni doğan, doğduktan sonraki ilk 10 günlük ve ilk 1 aylık süreçte çekilen fotoğrafları içermektedir. Veri setinde her bebek için ortalama 12 görsel bulunmaktadır. ERUBABYFACED veri setine ait örnek görseller Şekil 1 ile sunulmuştur.



Şekil 1. ERUBABYFACED veri setine ait bazı görseller

## 2.2 Veri Etiketleme

Veriler, sahip olduğu içerikler çerçevesinde kategorilere ayrılmaktadır. Yapay zekanın herhangi bir veriye özgü uygun çıktılar üretebilmesi için, o veriye ait önceden belirlenmiş kategoriye bilmesi ve her bir kategoriye ait özelliklere aşına olması gereklidir. Verilerin anlamlı parçalarının, ihtiyaç duyulan kategorilere göre işaretlenmesi işlemine veri etiketleme denir.

Yapay zeka tabanlı modellerde istenilen çıktının başarılı bir şekilde üretilmesi; yüksek oranda doğru, temiz, iyi etiketlenmiş ve hazırlanmış verilere bağlıdır. Çalışmamızda içerisinde bebek görselleri bulunan veri setinde bebeklerin yüz bölgeleri işaretlenecek şekilde veri etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Veri etiketleme işlemi labelImg [12] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek bir etiketleme Şekil 2 ile sunulmuştur.



Şekil 2. LabelImg ile örnek bir etiketleme

## 2.3 Derin Öğrenme

Derin öğrenme, yapay zekanın (AI) daha geniş bir alanı olan makine öğreniminin bir alt kümesidir. İnsan beyninin verilerdeki örüntüleri işleme ve tanıma yeteneğini simüle etmeye çalışan bir algoritma sınıfıdır. Derin öğrenme modelleri, büyük veri setlerini kullanarak karmaşık ilişkileri öğrenme ve öznitelikleri otomatik olarak çıkarma yeteneğine sahiptir. Dolayısıyla derin öğrenme doğrusal olmayan çoklu karmaşık işlemlerin bulunduğu katmanlardan oluşmaktadır. Her bir katman bir önceki katmanın çıktısını girdi olarak kabul etmektedir. Buradaki her katman denetimli veya denetimsiz algoritmalar olabilmektedir.

### 2.3.1 Evrişimli Sinir Ağları

özellikle görüntü ve video gibi görsel verileri işlemek ve analiz etmek için tasarlanmış bir yapay sinir ağı türüdür. Bir CNN girdi görüntüsünü alabilen, girdi görüntüsündeki çeşitli nesnelere önem (weight ve bias) değerleri atayan ve nesnelere birbirinden ayırt edilebilmesini sağlayabilen, aynı zamanda nesnelere birbirleriyle olan ilişkilerini ortaya çıkarabilen bir derin öğrenme algoritmasıdır. CNN özellikle görüntü verilerini işlemek ve analiz etmek için tasarlanmıştır.

CNN; evrişim katmanı (convolution layer), ortaklama katmanı (pooling layer), aktivasyon fonksiyonları (activation functions), tam bağlantılı katman (fully connected layer), kayıp katman (loss layer), düzenleme (regularization) ve optimizasyon (optimization) olmak üzere temel bileşenlere sahiptir [13].

## 2.4 TensorFlow

TensorFlow, Google Brain ekibi tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu derin öğrenme ve makine öğrenimi kütüphanesidir. TensorFlow ile çeşitli makine öğrenimi uygulamaları için derin sinir ağları eğitilebilmektedir ve çalıştırılabilmektedir. TensorFlow; Python, Go, Java, C++ ve diğer dillerle kullanılabilir. TensorFlow, bir görüntü hakkında daha karmaşık verileri ortaya çıkarmak için düğüm (nodes) adı verilen katmanları kullanmaktadır. Her bir düğüm ile daha derinlere inerek görüntüdeki karmaşık verileri ortaya çıkarmaktadır. En son çıktıya kadar veri katmanları arasında akan sürece tensor denilmektedir.

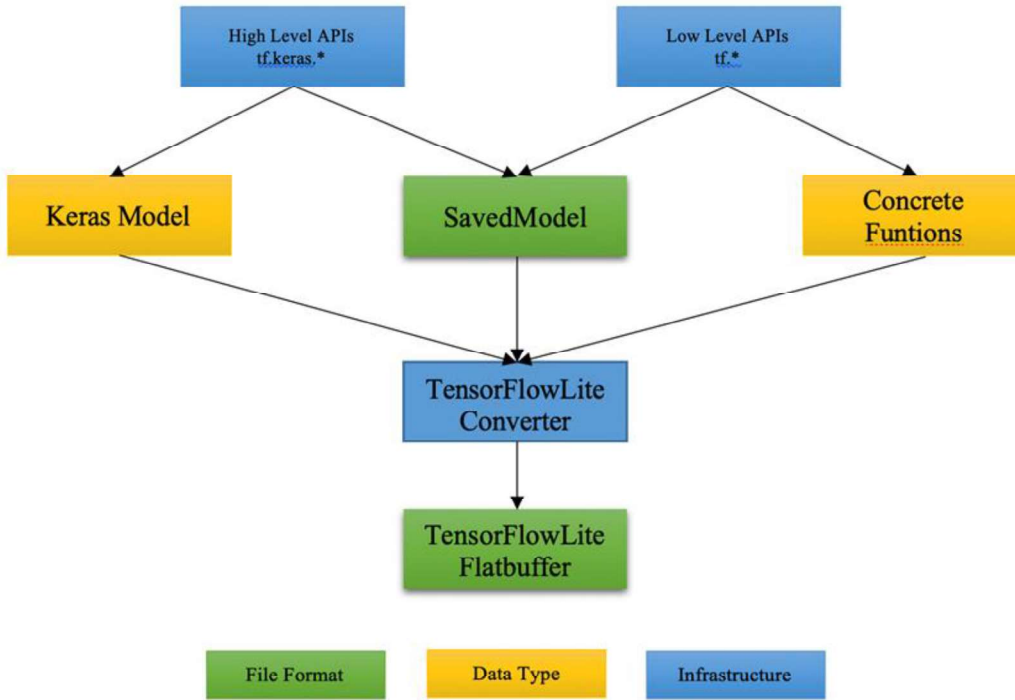
TensorFlow, çok boyutlu veri dizilerindeki görevleri tanımlamaktadır ve otomatik olarak hesaplamak yapmak için olanaklar sağlamaktadır [14]. TensorFlow birden fazla GPU ve CPU üzerinde çalışabilmektedir. TensorFlow birden fazla alanda kullanılabilir. TensorFlow'un yaygın olarak kullanılmasının en önemli sebeplerinden birisi de farklı platformda rahatlıkla çalışabilen kütüphanelere sahip olmasıdır. IOT cihazlar, web uygulamaları veya mobil uygulamalar için TensorFlow platforma uygun kütüphane sağlamaktadır [15].

#### 2.4.1 TensorFlow Lite

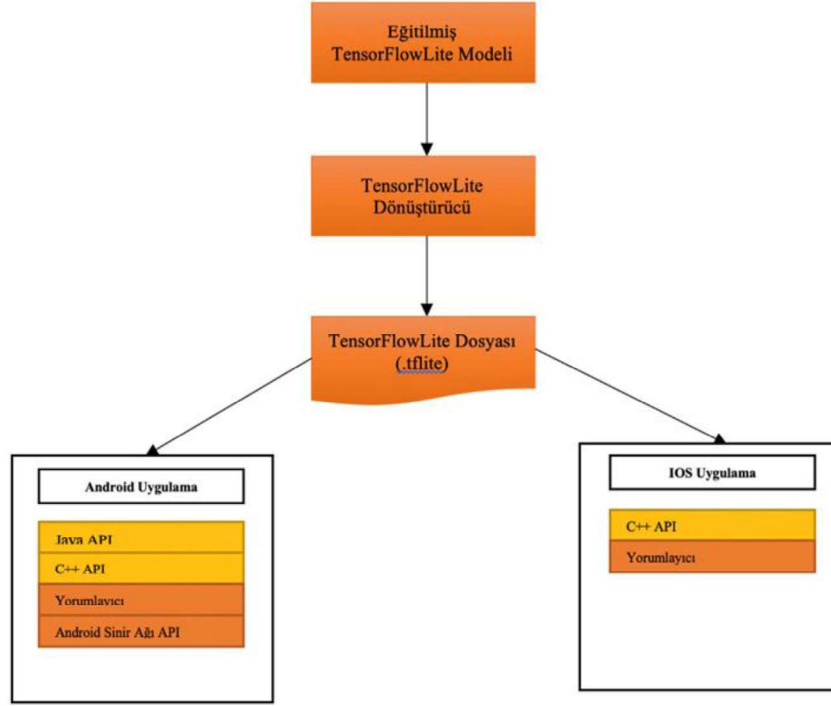
TensorFlow Lite, TensorFlow kütüphanesini mobil uygulamalarda veya IOT projelerde kullanabilmeyi sağlamaktadır. TensorFlow Lite'i mobil ve IOT cihazlarda kullanabilmek için eğitilen modelin .tflite uzantılı dosyaya dönüştürülmesi gerekmektedir. TensorFlow Lite iki ana bileşenden oluşmaktadır: TensorFlow Lite yorumlayıcı ve TensorFlow Lite dönüştürücü.

TensorFlow Lite yorumlayıcı, TensorFlow Lite modellerini çalıştırmak amacıyla kullanılan ara birimdir. TensorFlow Lite yorumlayıcı; minimum miktarda yük, başlatma işlemi ve uygulama gecikmeleri için statik bir grafik ve özel bir bellek ayırıcı kullanmaktadır [16].

TensorFlow Lite dönüştürücü, bir TensorFlow modelini TensorFlow Lite modeline dönüştürmektedir. Saved Model, tf.Keras Model, Jax Model ya da somut fonksiyonlar, TensorFlow Lite dönüştürücü tarafında TensorFlow Lite modeline dönüştürülebilir modellere örnektir. TensorFlow modelin TensorFlow Lite modele dönüştürülmesi işlemi Şekil 3 ile gösterilmiştir. TensorFlow Lite mimari yapısı Şekil 4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3. TensorFlow Modelin TensorFlow Lite modele dönüştürülmesi



Şekil 4. TensorFlow Lite mimari yapısı

### 3. Bulgular

10 bebeğe ait yüz görüntülerinden oluşan ortalama her bebek için 12 görselin bulunduğu toplamda 128 adet görsel içeren veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setinde yüz tespiti ve tanıma işleminin yapılması için ilk olarak labelImg kullanılarak veri etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Verilerin %75'i eğitim, %25'i test olarak ayrılmıştır. Eğitim için gerekli olan numpy, TensorFlow Lite kütüphaneleri import edilmiştir. Veriler eğitime hazırlanmıştır. EfficientDet-Lite[0-4] mimarisinden türetilen mobil/IOT cihazlarda kullanım sağlayan algılama modellerinden model seçimi gerçekleştirilmiştir. EfficientDet-Lite[0-4] modellerin performansları Tablo 1 ile gösterilmiştir. Bu tabloda tamsayı kuantize edilmiş modellerin boyutu, gecikme; CPU'da 4 iş parçacığı kullanılarak Pixel 4 üzerinde ölçülen değer ve ortalama hassasiyet; COCO 2017 doğrulama veri kümesindeki mAP (ortalama Ortalama Hassasiyet) değeridir.

Tablo 1. EfficientDet-Lite [0-4] modellerinin performansları

Model Mimarisi	Boyutu (MB)	Gecikme (ms)	Ortalama Hassasiyet
EfficientDet-Lite0	4,4	146	% 25,69
EfficientDet-Lite1	5,8	259	% 30,55
EfficientDet-Lite2	7,2	396	% 33,97
EfficientDet-Lite3	11,4	716	% 37,70
EfficientDet-Lite4	19,9	1886	% 41,96

Modellerden en iyi sonuç EfficientDet-Lite2 modeli ile alınmıştır. EfficientDet-Lite2 modeli eğitimi ERUBABYFACED veri seti üzerinde simüle edilmiştir. Eğitimde parametreler değiştirilerek model test edilmiştir. Test sonuçları Tablo 2 ile gösterilmiştir. Tabloya göre alt örnek sayısını ifade eden batch\_size parametresinin 8, eğitim sırasında tüm eğitim verilerinin ağı gösterilme sayısını ifade eden epochs parametresinin 100 seçildiği durumda %95 ile en iyi başarı oranı elde edilmiştir. Model, mobil ve IOT cihazlarda kullanabilmek amacıyla TensorFlow Lite modele dönüştürülmüştür.

Tablo 2. Farklı parametrelerle test sonuçları

batch_size	epochs	Doğruluk Oranı	Eğitim Süresi
4	50	0.82	6 dakika 21 saniye
8	100	0.95	8 dakika 18 saniye

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada bebeklere ait görseller üzerinden yüz tespiti ve tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sürecinde ilk olarak literatür taraması gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada mevcutta bebeklere ait hazır veri seti bulunmaması sebebi ile bebek yüz görüntülerini içeren veri seti oluşturulmuştur. Veri seti içerisinde bulunan görseller labelImg kullanılarak veri etiketleme işlemine tabii tutulmuştur. TensorFlow Lite kütüphanesi kullanılarak EfficientDet-Lite[0-4] mimarisinden türetilen modellerden birisi seçilmiştir. Modelin eğitimi gerçekleştirilmiştir. Modelin testi sırasında farklı parametreler kullanılarak en iyi sonucun alınması amaçlanmıştır. %95'e kadar doğruluk oranı elde edilerek başarılı bir sonuç alınmıştır. Son olarak modelin mobil ve IOT cihazlara rahatlıkla entegre edilebilmesi amacıyla model TensorFlow Lite modele dönüştürülmüştür.

ERUBABYFACED veri seti üzerinde TensorFlow Lite ile başarılı sonuçlar elde edilse de bu çalışma için bazı kısıtlamaların varlığını belirtmek gerekmektedir. Öncelikle oluşturulan veri seti az sayıda görüntü barındırmakta ve her bir sınıf için farklı sayıda örnek sayı içerdiğinden dengesiz (unbalanced) bir veri setidir. Daha gürbüz modellerin geliştirilmesi için görüntü ön işleme ve çoğullama seçenekleri ile veri sayısı artırılabilir ve veri seti daha dengeli hale getirilebilir. Bir diğer kısıtlama ise aynı bebeğe ait elde edilen görüntülerin farklı zamanlara ait olmasından dolayı bebek yüzünün değişmesidir. Bu yüz tanıma sisteminin başarımını zorlaştırmakta ve klasik yöntemlerin tespit ve tanımadaki başarımını riske atmaktadır. Derin öğrenme modelleri dışında kullanılacak klasik sınıflandırma algoritmaları için veri seti, veri çoğullama vb. süreçlerden geçirilerek çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Gelecek çalışmalara ek olarak mevcut veri seti üzerinde başarı oranını artıracak yeni modellerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca CNN tabanlı TensorFlow Lite kütüphaneleri ile geliştirilecek yeni modeller farklı veri setleri üzerinde simüle edilecektir.

#### Teşekkür

Bu çalışma finansal olarak; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından (Proje No: FYL-2022-11714) desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Tolba, A. S. (2006). AHE-B., and AA El-Harby, Face recognition: A literature review. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 2(2). 88-103.
- [2] Parmar, D. N., Mehta, B. B. (2014). Face recognition methods & applications. arXiv preprint arXiv:1403.0485.
- [3] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- [4] Aslantaş, V., Kurban, R., Toprak, A., Bendes, E. (2015). An interactive web based toolkit for multi focus image fusion. *Journal of Web Engineering*, 14.
- [5] Pang, B., Nijkamp, E., Wu, Y. N. (2020). Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), 227-248.
- [6] Warden, P., Situnayake, D. (2019). *Tinyml: Machine learning with tensorflow lite on arduino and ultra-low-power microcontrollers*. O'Reilly Media..
- [7] Fadlilah, U., & Handaga, B. (2021, April). The development of android for Indonesian sign language using tensorflow lite and CNN: an initial study. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1858, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- [8] Zeroual, A., Dourdour, M., Amroune, M., & Bentahar, A. (2019, June). Using a fine-tuning method for a deep authentication in mobile cloud computing based on Tensorflow Lite framework. In *2019 International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS)* (pp. 1-5). IEEE.
- [9] Alsing, O. (2018). Mobile object detection using tensorflow lite and transfer learning.
- [10] Abed, A. A., Al-Ibadi, A., & Abed, I. A. (2023). Real-time multiple face mask and fever detection using YOLOv3 and TensorFlow lite platforms. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(2), 922-929.
- [11] Aralikatti, A., Appalla, J., Kushal, S., Naveen, G. S., Lokesh, S., & Jayasri, B. S. (2020, December). Real-time object detection and face recognition system to assist the visually impaired. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1706, No. 1, p. 012149). IOP Publishing.
- [12] Lin, T. 2015. LabelImg. <https://github.com/tzutalin/labelImg>. (Erişim Tarihi: 15.08.2023).

- [13] Özcan, T., 2020. Derin Öğrenme ile İnsan Edimlerinin Tanınması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 204s, Kayseri.
- [14] AKARSU, K., BORANDAĞ, E., YÜCALAR, F. 2019. Tensorflow ile sebze-meyve hallerinde nesne takibi. ICCTAFA. 1-5.
- [15] KIZILDAŞ, E. 2019. Tensorflow Hakkında. <https://medium.com/emrekizildas/tensorflow-hakk%C4%B1nda-d71e73b81b85>. (Erişim Tarihi: 17.08.2023)
- [16] KİRAZ, M. 2019. TensorFlow-Lite. <https://puffyy.medium.com/tensorflow-lite-ecae0b7a452a#:~:text=TensorFlow%2DLite%2C%20TensorFlow%20modellerinin%20mobil.taraf%C4%B1ndan%20olu%C5%9Fturulmu%C5%9F%20bir%20ara%C3%A7%20seti>. (Erişim Tarihi: 17.08.2023).

## Categorization of Technical Debt in Software as a Service Applications

Özden ÖZCAN TOP\*<sup>ID</sup>, Yasemin KURANEL\*<sup>ID</sup>, Altan KOÇYİĞİT\*<sup>ID</sup>

(Alınış / Received: 08.09.2023, Kabul / Accepted: 09.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords

Technical Debt,  
Software as a Service,  
Technical Debt in SaaS,  
SaaS

**Abstract:** Technical debt (TD) refers to the outcomes of making poor decisions or choosing simpler solutions generally for the sake of faster code delivery in software development projects. Eventually, TD is repaid and usually the long-term costs overweigh the short-term benefits. Therefore, proper identification and management of technical debt is crucial in any software development effort. Although the technical debt concept in the software domain has been extensively studied in the literature, there is a limited understanding of the indicators of TD in Software as a Service (SaaS) applications. Hence, this study investigates the indicators and major categories in organizations that provide support for SaaS applications to their customers. To this end, an exploratory case study has been conducted in a SaaS development vendor partner and consultancy company. Interviews have been conducted with nine employees in the company and an in-depth analysis of collected data have been carried out to identify the major technical debt categories specific to SaaS applications. The results revealed that TD categories and problems in traditional software applications are also valid for SaaS projects. There are also new categories of TD specific to SaaS. We identified 15 unique SaaS-specific technical debt categories associated with 23 relevant indicators. Additionally, we noted the presence of 81 generic software technical debt indicators, classified under 23 categories.

## Hizmet Olarak Yazılım Uygulamalarında Teknik Borcun Kategorizasyonu

### Anahtar Kelimeler

Teknik Borç,  
Hizmet Olarak Yazılım,  
Hizmet Olarak Yazılımda  
Teknik Borç,  
SaaS

**Öz:** Teknik borç (TB), yazılım projelerinde genellikle daha hızlı kod teslimi için daha basit çözümler seçme veya kötü kararlar alma sonucunda ortaya çıkan durumları ifade eder. Sonuçta TB ödenir, ancak uzun vadeli maliyetler, kısa vadeli faydaları aşar. Bu nedenle, teknik borcun uygun bir şekilde tanımlanması ve yönetilmesi her yazılım geliştirme projesinde önemlidir. Yazılım alanında teknik borç kavramı literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmesine rağmen, Hizmet Olarak Yazılım (SaaS) uygulamalarındaki TB göstergeleri oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışma, müşterilerine SaaS uygulamaları için destek sağlayan organizasyonlardaki TB göstergelerini ve başlıca kategorileri araştırmaktadır. Bu amaçla çalışmada, bir bağımsız SaaS ortağı olan danışmanlık şirketinde keşif amaçlı bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda şirkette dokuz çalışanla görüşmeler yapılmış ve toplanan verilerin derinlemesine analizi ile SaaS uygulamalarına özgü başlıca TB kategorileri belirlenmiştir. Sonuçlar, geleneksel yazılım uygulamalarındaki TB kategorilerinin ve sorunlarının SaaS projeleri için de geçerli olduğunu göstermiştir. SaaS'a özgü 15 TB kategorisi ile ilişkili 23 TB göstergesi tespit edilmiştir. Buna ek olarak, genel yazılım projelerinde de geçerli olacak 81 TB göstergesi, 23 kategori altında gözlenmiştir.

\*İlgili Yazar, email: ozdenoz@metu.edu.tr

### 1. Introduction

Metaphors are cognitive lenses that help us make sense of situations and reality [1]. Technical Debt (TD) metaphor is used to describe the effects that result from making suboptimal decisions or taking shortcuts for various reasons during software and system development [2]. Although suboptimal decisions and solutions may save time and effort in the short term; they lead to issues in software product, requiring more time and effort for improvement and bug fixing in the long term [3][4].



Swift decisions and quick measures taken during software development life cycle impacts the final product quality [5]. Major factors contributing to suboptimal decisions that result in technical debt may include customer pressure, poor communication, low levels of code testing coverage, compromised or rigid software architecture, and insufficient documentation. These issues are also common in cloud computing service models, as they increase with platform-specific boundaries and limitations, and ultimately lead to problems in software processes and malfunctions in the end product delivered to customers [6][7][8].

Software as a Service (SaaS) is a cloud-based software delivery model where applications are provided to users by a service provider such as Google Cloud, Microsoft Azure or Salesforce [9]. Users of SaaS applications pay for the services on a subscription basis [10][11]. There has been a growing interest to such applications. According to Gartner's recent report, it is estimated that SaaS end-users is expected to spend around 195 Billion U.S. dollars worldwide in 2023 [12]. The key characteristics of SaaS applications include accessibility from any internet-enabled device, automatic updates to services, and scalability when needed. They also eliminate the need for businesses to install, run and maintain on-premises software and enable significant savings on hardware, software, and personnel costs [13].

There has been extensive research on technical debt from a general software development perspective. Nevertheless, understanding technical debt specific to SaaS applications is essential due to the unique challenges that this software delivery model presents. SaaS platforms, especially multitenant ones deliver scalable, reliable and customizable software to their customers. The complexity of cloud-based architectures, frequent updates to satisfy rapidly evolving customer expectations, and continuous delivery often pose distinct challenges and can cause unusual forms of technical debt. Addressing these challenges is essential as accumulating technical debt can lead to slower feature delivery and degraded quality of service. Moreover, as the SaaS business model typically relies on regular user subscriptions, maintaining a high quality of experience is critical to retain customers and attract new ones, thereby improving return on investment and ensuring profitability. Any slowdown or degradation in service quality due to technical debt can lead to customer dissatisfaction and eventually result in loss of revenue [14].

The purpose of this research is to specify and categorize the technical debt indicators and categories specific to Software as a Service application development projects. In order to achieve these purposes, we performed an exploratory case study in a SaaS-based customer relationship management application development company by interviewing nine employees who have various roles and experiences in product development and maintenance. We performed the interviews based on the ISO/IEC 12207 Software Life Cycle Processes categories to follow a systematic approach, and analyzed the interview data using the qualitative coding technique. This study contributes to the literature by specifying novel TD categories for SaaS projects and augmenting the existing knowledge about technical debt for general software development projects. The SaaS-specific TD categories and indicators can be used for facilitating more effective technical debt management throughout the software development life cycle.

The rest of the paper is structured as follows. Section 2 gives background information on technical debt and SaaS applications and provides the review of the literature. Section 3 explains the case study design and conduct stages, and the validity threats. Section 4 presents the results. The findings and discussions are provided in Section 5. Finally, Section 6 concludes with major findings of the study and future work.

## **2. Background and Related Work**

### **2.1. Software as a Service (SaaS)**

SaaS, also known as on-demand software, is a way to deliver software applications running on cloud platforms over the Internet as a service. Unlike on-premises software, which basically requires installation and maintenance by users, Software as a Service enables users to readily access the required services provided on cloud platforms via the Internet. SaaS solutions are usually preferred because of their lower upfront costs when compared to traditional or on-premise software [15].

SaaS applications typically use a multitenant architecture, where all applications and users share a single infrastructure and code base. This essentially enables faster and easier innovation of SaaS. As the software is delivered through the Internet, SaaS applications are ubiquitous. The ability for each user to access the services wherever and whenever they need them with adequate quality of service improves productivity and forms trust and satisfaction [16]. SaaS applications not only differ from packaged software based on cost advantage, but also their benefits on scalability, rapidness in implementation, accessibility, managing update frequencies, and ensuring security [17].

A noteworthy difference between a packaged software and SaaS is the ease of customization, which plays a significant role concurrently supporting multiple organizations with diverse needs and varying business processes with the same system. Most SaaS solutions provide no-code solutions or high-level abstractions, thereby saving both from development time, and the cost of maintaining a code base. Additionally, no-code automation and customization prevent harmful effects on the common infrastructure, enabling organizations to achieve success in their business processes [9][17]. While making the changes, users take advantage of using SaaS solutions, benefitting from documented and ready-to-use solutions for their use cases if the service provider offers the specifications of the platform, software or service. Organizations can handle these development and maintenance work through in-house teams, external support, or independent software vendors (ISVs) [9]. ISV partners refer to companies that specializes in creating and distributing software applications hosted in the cloud and offer services to customers under a subscription model. These vendors maintain their autonomy while forming strategic partnerships with larger platform providers, such as cloud hosting services to enhance their service delivery.

## 2.2 Technical Debt

Technical debt occurs when a suboptimal solution adds value to the software but leads to undesirable consequences. In other words, taking shortcuts during analysis, design, implementation, testing or even documentation phases of a project might end up in more effort and time spent on the tasks to resolve a defect or to enhance the quality of the end product [18]. The “technical debt” term was coined by Cunningham (1992) [2] in an experience report as follows: “...Shipping first time code is like going into debt. A little debt speeds development so long as it is paid back promptly with a rewrite.... The danger occurs when the debt is not repaid. Every minute spent on not-quite-right code counts as interest on that debt.” Since then, the term technical debt is used to define (usually) conscious technical decisions that will help in short-term or with a more urgent request, but that may have negative outcomes in the future for other dimensions.

Studies prove that technical debt must be seriously taken into consideration and carefully managed to prevent everlasting payment of the “debt”. A survey study conducted by Besker et al. [19] indicates that 36% of overall development time on average is wasted due to the technical debt. Noteworthy, it was stated that most time is spent on understanding the root cause of technical debt.

High TD awareness is the first step towards managing it [20], and its management becomes easier when causes and impacts of TD are identified. In prior research, various methods for identifying and managing TD have been explored. Falessi and Kazman [21] and Ramač et al. [22] conducted surveys among software practitioners to identify common TD issues, their frequency, and causes. They also reported on practitioners’ familiarity with the TD concept. Notably, multiple case studies have compared technical debt management across different companies [23][24][25][26]. Kruchten et al. [3] surveyed the evolution of technical debt, and proposed an organizational solution.

Technical debt categorization is crucial for making informed decisions and proper management of TD in software development projects. It helps teams understand the specific type of debt they are dealing with, prioritize their solution efforts based on the debt’s impact, and align these efforts with the project’s overall goals. This organized approach also enhances communication among stakeholders, guides resource allocation, and aids in tracking the progress of debt reduction [3][27].

Alves et al. [28] performed an SLR to reveal different TD types and indicators, considering the nature of the development process. Zazworka et al. [6] advocated using automated tools over manual methods, while Ramasubbu and Kemerer [29] considered the TD types arising from client-vendor interdependencies during system maintenance and Codabux et al. [4] took an empirical approach by gathering insights from practitioners on TD management.

Specifically, we can talk about three technical debt categorization levels. The first level technical debt categorization can simply be performed on the *intention level* as suggested by McConnell [30]. Based on this categorization, each technical debt can be categorized as *Intentional* or *Unintentional*. At the second categorization level, Fowler [31] classifies the technical debt based on the intention of the person who creates the debt but in a more detailed way than McConnell’s classification: *Deliberate, Reckless, Inadvertent and Prudent*. At the third level, Alves et al. [28] presented 13 technical categories at the process level based on a systematic literature review study. These are *Architecture Debt, Build Debt, Code Debt, Defect Debt, Design Debt, Documentation Debt, Infrastructure Debt, People Debt, Process Debt, Requirement Debt, Service Debt, Test Debt, Usability Debt* and *Versioning Debt*.

In our previous research on detecting technical debt on ambiguous issue statements (*the citation was removed intentionally to ensure double blind review process*), we specified that most of the choices leading to architectural or structural debt was unintentional, as the effects of these decisions often become clear only in the later stages of the software development cycle. However, almost all suboptimal solutions chosen purposefully to address customer or stakeholder needs result in decreased product quality.

### 2.3 Technical Debt in SaaS

Despite these extensive studies on TD in software domain, our understanding of TD in SaaS applications and enterprise-level software, such as customer relationship management software, remains limited. Klinger et al. [26] conducted interviews with technical architects related to enterprise solutions, while Alzaghoul and Bahsoon [25] analyzed the option-based approach to clear TD in cloud-based solutions. Ramassubbu and Kemerer [29] quantified the negative impact of TD on system reliability. Kumar et al. [32] worked on identifying and estimating TD in SaaS clouds, emphasizing the distinction between "good debt" and "bad debt" in the context of SaaS applications.

In SaaS projects, it has to be ensured that the customizations and developments are compatible with the system's architecture and infrastructure. Proper documentation of changes made by external providers, ISVs, or in-house teams is necessary. Undocumented or poorly executed changes, especially by less-experienced staff, can lead to issues similar to those in on-premise services, or specific to the SaaS application and its infrastructure [33]. SaaS providers often address these problems through regular updates or bug-fixes, and users must follow these updates closely [34]. It is also vital to document customizations and business processes to avoid technical debt, which can become a problem in SaaS applications if not managed carefully.

As understood from our first case study (*the citation was removed intentionally to ensure double blind review process*) in identifying TD based on ambiguous issue statements, we determined that Level 3 categorization holds greater significance for comprehending the underlying causes of technical debt. This level of categorization yielded more detailed insights, aligning closely with the phases of the software development life cycle. However, Level 3 categorization needs to be specifically examined in the context of SaaS and CRM applications to better understand the nature of technical debt in these systems.

## 3. Case Study Design and Conduct

In order to determine technical debt categories specific to SaaS applications, we preferred to follow the qualitative research approach [35]. To gain a deeper understanding of a phenomenon in a specific field and communicate with research participants in their natural settings, we conducted an exploratory case study [36] and aimed to answer the following research questions:

**RQ1:** What are the indicators highlighting TD in SaaS application development?

**RQ2:** What are the technical debt categories specific to SaaS applications?

Below, we describe the case study design and conduct stages.

### 3.1 Case, Process and Participant Selection

We used the purposive sampling technique in determining the case organization [37]. In our purposive sampling process, we aimed at finding a company that primarily focuses on developing SaaS applications. Such a company should fulfil essential software development life cycle activities, such as software analysis, design, implementation, testing and project management to a certain level. Additionally, a key criterion was the presence of an active SaaS development project within the company. As the practitioners were expected to discuss the problems that they experience in software development based on their current project, they would be more precise about the issues and the root causes of these issues.

Below, the case study components and the decisions we made at the design stage are described.

**The Case Company:** The company we selected for conducting the exploratory case study specializes in asset and file management and is involved in various implementation and integration projects on multiple platforms. The company has several teams that are competent and work on various digital platforms. The number of employees of the company is around 100. Apart from integration and platform-based solutions, there are also software products that the company works on and offers to the market. The main purpose of most of these products is to facilitate asset management and to create cost-effective solutions. The remaining products aim to provide an ease of integration for customers and to increase customer communication.

**The Case Project:** For the case project, we selected an ongoing SaaS-based CRM (customer relationship management) project. The platform that has been used in the case product is Salesforce. Salesforce company is specialized in CRM applications, with a focus on sales, marketing and customer services. The company both offers SaaS and platform as a service (PaaS). The CRM product that we choose for the case has been released to the market for about 15 years ago and new feature enhancements and maintenance work continue since then. The goal of the product is to provide a cost-effective customer file management system for a specific SaaS platform. Various developers and experts have contributed to the product over the years. Specifically, product and platform-based development activities have been going on in our case company by a team of 8-10 people for the last five years. The product that the case company offers to the market not only includes platform-oriented components, but also 3<sup>rd</sup> party packages and products. Some of which are managed by the core team. Since the product was developed for the platform, it must comply with the limitations, requirements and security obligations imposed by the platform. Due to these characteristics, it was considered that the project is a very good candidate for observing various TD categories.

**The Software Life Cycle Processes:** In order to understand the nature of the TD in SaaS applications, the first step was to design an interview questionnaire. The main purpose of the interview was to access wide range of different technical debt issues experienced by people working in organizations like our case company, having various experiences and roles in the project. In order to follow a structured approach in specifying the interview questions, we used the ISO/IEC 12207 [38] software life cycle process standard as the basis. In accordance with the goals of this study, we focused on the following technical management and technical process sub-group given in Table 1.

**Table 1.** Selected ISO/IEC 12207 Software Development Life Cycle Processes

Process Group	Process Name	Referring ISO/IEC 12207 Process ID
Technical Management Processes	Project Planning Process	6.3.1
	Project Assessment and Control Process	6.3.2
Technical Processes	Stakeholder Needs and Requirements Definition Process	6.4.2
	Systems/Software Requirements Definition Process	6.4.3
	Architecture Definition Process	6.4.4
	Design Definition Process	6.4.5
	Implementation Process	6.4.7
	Integration Process	6.4.8
	Verification Process	6.4.9
	Validation Process	6.4.11

**The Interviewees:** While choosing the interviewees, we aimed to access employees who have participated in the selected ISO/IEC 12207 Software Life Cycle development processes given in Table 1. The interviewees were not only defined by their roles, but also their expertise level in SaaS and software development. We contacted the potential participants through the company’s point of contact. In total, we have agreed with nine employees in the project who are willing to discuss their experiences and issues that they experience in SaaS development process. The roles, experience levels and TD awareness levels of these participants as gathered from interviews are summarized in Table 2. TD Awareness levels have been categorized based on the definitions given below:

- **Low TD Awareness:** The participant might be unfamiliar with the TD metaphor entirely. However, they might still provide general examples of TD during the interview. Alternatively, they may understand the metaphor but remain uncertain about what is recognized as TD in the processes they are a part of.
- **Intermediate TD Awareness:** The participant is familiar with the TD metaphor and offers examples, though these might lack depth. They don't articulate the impact of TD on processes or share views on managing it.
- **High TD Awareness:** The participant has a clear understanding of the TD metaphor, provides specific examples of TD, recognizes the indicators, and is aware of issues arising from TD. They also offer insights on strategies to address or manage TD.

**Table 2.** Roles, experience levels, and TD awareness levels of each interviewee

ID	Role	Experience Level in Software Development (in years)	Experience Level in SaaS Development (in years)	TD Awareness
----	------	---	---	--------------

1	Consultant	3	3	Low
2	QA Engineer	5	5	High
3	Developer	4	4	High
4	Developer	5	2	Intermediate
5	Team Lead	13	3	High
6	Developer	5	2.5	Low
7	Developer	3	3	Intermediate
8	Release Manager	2	2	Low
9	Customer Support Specialist	5	2.5	Intermediate

### 3.2 Interview Questions

We identified the interview questions given in Table 3 to retrieve as much as possible information from the interviewees. These questions were designed in an open-ended structure and applicable for all processes given in Table 1. We specifically aimed not to emphasize the technical debt term presuming that the initial awareness of the interviewees on the subject are low. The interview questions were prepared in English and Turkish, as there were people in the team with nationalities other than Turkish as well.

**Table 3.** Interview Questions

No	Questions
1	What is your role in the organization, and what kind of responsibilities do you have in the company and the projects?
2	Can you describe the project and the technologies being used in the project?
3	Which of the following Software Life Cycle Processes do you participate in the project? Project Planning, Project Assessment and Control, Stakeholder Needs and Requirements Definition, Systems/Software Requirements Definition, Architecture Definition, Design Definition, Implementation, Integration, Verification, Validation
4	Do you experience any issues with the processes/practices that you participate in the project?
5	Do you practice the tasks/activities defined for each process specified in ISO/IEC 12207?
6	Do you think there are tasks that you fail or don't achieve completely?
7	What kind of problems occur in the project due to these issues?
8	How did you realize these problems? Do you have any further observations on the problems?
9	Do you know if these problems are caused by the SaaS provider or the development team that you belong to?
10	Do you have any recommendations or a way to solve/prevent these problems?
11	Do you experience any further challenges regarding the usage of SaaS applications in the project?
12	Do you sometimes choose easy/limited solutions to problems in your project, instead of using a better approach?
13	Do you have rework or refactoring cycles for your source code?
14	Do you have any problems that you choose not to fix/solve and only monitor the course/trend over time?
15	Are you familiar with the technical debt metaphor?
16	Do you measure the technical debt that is present in your project, using any tools or processes?
17	Do you mostly monitor or take further action on technical debt issues?
18	How do you decide the managerial activities on the technical debt issues?
19	Do you have any metrics or scale to prioritize the technical debt issues?
20	Do you have any technical debt that is expected to become worse in the future?
21	To what extent does technical debt affect your motivation?
22	Is your management aware of technical debt and are they taking any action?
23	Do you have additional issues that you would like to mention/highlight?
24	Do you think that there's room for improvement for your project/organization?

### 3.3 Validity Threats

In the design stage of this research, another aspect that we considered was the mitigation strategies to the validity threats. As a qualitative research methodology, the case study approach is subject to certain validity challenges. To ensure the integrity of our findings, we have determined and implemented measures to address potential threats to internal, construct, and external validity.

### 3.3.1. Construct Validity

Construct validity assesses whether the research tools accurately measure the variables or constructs they aim to evaluate [36]. For our study, it was necessary to ensure our interview questionnaire was capable of identifying SaaS-related TD categories without oversight. To this end, we utilized the ISO/IEC 12207 [38] software life cycle process standard as our foundation. We selected ten processes that spanned both technical and managerial categories from ISO/IEC 12207.

Another element that could influence construct validity is the potential ambiguity in terms and definitions used in the research. In particular, as presented in Table 2, team members demonstrate different levels awareness regarding TD. Recognizing that members of the SaaS project development team might interpret the term “technical debt” in various ways, we reframed our questions. Instead of asking, “What specific technical debt issues do you encounter?”, we posed, “What kind of problems do you experience in relation to a specific process?”.

### 3.3.2. Internal Validity

Internal validity considers the degree to which the observed effects in the research are actually caused by the manipulated variables or interventions, rather than some other external factors [36]. In our case study, we considered the possibility that the SaaS development team members might provide answers they believe the researchers want to hear. To mitigate this potential bias, we assured the participants that their responses would be kept confidential, and any data published would be anonymized. We believe this approach minimizes participant bias. Furthermore, instead of prompting for confirmatory answers, we encouraged participants to give detailed, descriptive, open-ended responses to our interview questions, elaborating on problematic situations as comprehensively as possible.

### 3.3.3. External Validity

External validity concerns the generalizability of the research findings outside the specific context or sample in which the research was conducted [36]. As the study focuses on a single CRM application, the findings might not be generalized to other SaaS applications or other domains. In the findings and results sections, we clearly stated the research findings. These insights are highly valuable; however, they pertain primarily to the specific CRM application studied. Additional qualitative and quantitative research is needed to explore technical debt categories in SaaS application for other domains. We performed the interview with nine employees in a SaaS project and covered a wide diversity of the roles and experience levels within the development team. This has provided a more comprehensive view of the technical debt landscape.

## 3.4 Case Study Conduct

In this section, we explain the data collection and data analysis stages of the case study.

### 3.4.1 Data Collection

The data was obtained from semi-structured interviews based on the questions provided in Table 3. We followed the techniques recommended by Patton [39] to ensure comprehensive coverage of every process listed in Table 1, while also retrieving participants’ experiences in a flexible way. In total, nine face-to-face interview sessions were conducted, with each taking around 45 minutes. Out of the nine interviewees, two preferred to conduct their interviews in English. Each team member was responsible for at least one SDLC process listed in Table 2. The SDLC processes experienced by the organization, in terms of the number of participants responsible for each process, are detailed below.

At the start of each interview session, the participants were asked about the processes for which they were responsible. To aid in this, the names and purposes of each process were presented to the participants. If a participant requested examples for any process, these were also provided by referring to the activities defined in the ISO/IEC 12207 standard. Table 4 given below shows the SDLC process involvement for each interview participant.

**Table 4.** SDLC process involvement for each interviewee

Process Name / Interviewee #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Project Planning Process					X			X	X
Project Assessment and Control Process								X	
Stakeholder Needs and Requirements Definition Process			X	X	X		X	X	X
Systems/Software Requirements Definition Process			X	X	X	X	X		

Architecture Definition Process		X	X	X		
Design Definition Process		X	X	X	X	X
Implementation Process	X	X	X	X	X	X
Integration Process	X	X	X	X	X	
Verification Process	X		X	X	X	X
Validation Process	X				X	X

### 3.4.2 Data Analysis: Coding and Categorization

In analyzing the data, we applied open and axial coding techniques to identify themes, as recommended by [40] and Lochmiller [41]. First, the interview data was first transcribed. The coding and categorization processes were carried out in three iterative and incremental stages.

During the first stage, open coding helped us specify initial TD indicators within the project. Next, we established connections between the codes, focusing on process levels and keywords highlighted by the participants. These stages enabled us to detect TD categories specific to SaaS development, addressing RQ1 and RQ2 respectively. While determining TD categories, we sought patterns that could define TD category themes. To ensure consistent and accurate coding, two review sessions were held: one after the open coding and another at the end of the analysis.

The TD indicators identified from the interview transcripts, along with the resulting TD categories, will be presented in the following section.

## 4. Findings

SaaS applications are intrinsically complex. They are built to serve clients with diverse needs and designed to be universally accessible. Therefore, they frequently subject to updates and modifications. As businesses race to introduce new features or adapt to market demands, there is often a tendency to make swift decisions, sometimes overlooking long-term implications. Such decisions can inadvertently introduce technical debt.

Table 5 given below presents technical debt indicators and categories for both SaaS applications and generic software development projects. In total, we identified 38 TD categories, and 15 of them are specific to SaaS projects. We also found 104 TD indicators in total, 23 being related only to SaaS projects.

These indicators were derived directly from responses given by interview participants during our case study. Once the indicators were defined, the categories were determined over three iterations. Multiple instances of TD indicators have been removed from Table 5.

The table's first column specifies if the TD category and its associated indicators are common in generic software development or are unique to SaaS projects. This is followed by columns providing the TD category name, its description, and the corresponding TD indicators. The table is organized in ascending order based on the TD categories. SaaS-specific technical debt categories are highlighted with an orange background.

**Table 5.** TD categories, TD descriptions and associated TD indicators

TD Type SaaS-Specific / Generic	TD Category	Category Description	TD Indicators
Generic	1. Communication Issues	Represents any problems related to conveying or understanding information among team members, stakeholders, or customers.	a. Communication barriers on work tracking b. Miscommunication on customer requests c. Miscommunication with stakeholders/team members
Generic	2. Design Adaptability Challenges	Indicates the difficulties in adjusting designs based on evolving customer requests or requirements.	a. Customer driven volatile design

<b>Generic</b>	3.	Design and Implementation Mismatch		Denotes scenarios where the design and the actual implementation don't align or match as intended.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Incomplete implementation wrt design</li> <li>b. Insufficient design maintenance</li> <li>c. Insufficient design verification/validation</li> </ul>
<b>Generic</b>	4.	Design Inadequacy		Addresses instances where the design is incomplete, flawed, or based on incorrect assumptions.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Design with incomplete/incorrect requirements</li> <li>b. Incomplete design</li> <li>c. Lack of solid design principles</li> </ul>
<b>Generic</b>	5.	Design Inefficiency		Covers situations where the design process or outcome is inefficient, overly complex, or doesn't adhere to standard practices.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Overengineering</li> </ul>
<b>Generic</b>	6.	Design Process Inefficiency		Refers to instances where the design process is flawed or doesn't yield optimal results.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Poor design process</li> </ul>
<b>Generic</b>	7.	Document Maintenance Deficiency		Indicates a lack of adequate updates, maintenance, or attention to various project or system documents.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Insufficient maintenance of design documentation</li> </ul>
<b>Generic</b>	8.	Documentation Deficiency		Refers to situations where critical documentation is missing or inadequate, potentially leading to confusion or mistakes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Inadequate architecture definition</li> <li>b. Inadequate design definition</li> <li>c. Insufficient design documentation</li> <li>d. Insufficient requirements documentation</li> <li>e. Missing documentation</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	9.	Explorative Challenges	SaaS	Challenges that emerge when attempting to innovate or implement new methods, features, or processes within a SaaS environment.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Exploration of new approaches in SaaS</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	10.	Inadequate Support	SaaS	Occurs where the SaaS provider does not offer enough assistance, guidance, or customer service for users facing issues.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Inadequate support from SaaS provider</li> </ul>
<b>Generic</b>	11.	Inadequate Technical Management	Debt	This theme refers to the challenges of managing, addressing, or accumulating technical debt in the project.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Bug-focused releases</li> <li>b. Customer-driven quick fixes</li> <li>c. Delayed problem identification</li> <li>d. Developer-initiated refactoring</li> <li>e. Incomplete solutions</li> <li>f. Rework for fixed problems</li> <li>g. Lack of design refactoring</li> <li>h. Post-verification problem identification</li> <li>i. Quick unconventional fixes</li> <li>j. Refactoring cycles</li> <li>k. Rework time constraints</li> <li>l. Rigid architecture and coding structure</li> <li>m. Temporary fixes</li> </ul>



<b>Generic</b>	12.	Inefficient Work Planning/Estimation	Captures issues related to misestimating work durations, improperly planning tasks, or having conflicts about priorities	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Decision ambiguities</li> <li>b. Estimation difficulties</li> <li>c. Issue priority conflicts</li> <li>d. Planning conflicts with upper management</li> <li>e. Priority conflicts</li> <li>f. Rising ticket resolution time</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	13.	Insufficient SaaS Communication	A lack of clarity or adequate information from the SaaS provider. This can be in terms of potential impacts, updates, or changes that might affect users.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Insufficient impact information from SaaS</li> </ul>
<b>Generic</b>	14.	Issue/Task Description Issues	Highlights problems arising from unclear or incomplete descriptions of tasks or issues.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Insufficient issue details</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	15.	Known SaaS-Specific Issues	Issues that are already identified and recognized with the SaaS provider. These are often listed or documented but remain unresolved.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Pre-existing issues with SaaS</li> </ul>
<b>Generic</b>	16.	Legacy System Challenges	This theme refers to the difficulties associated with maintaining, upgrading, or working within older systems that may no longer be efficient or compatible with newer technologies.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Legacy system maintenance</li> </ul>
<b>Generic</b>	17.	Process Adherence Issues	Highlights situations where established processes are not being followed or are incompletely adhered to.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Incomplete process adherence</li> <li>b. Ineffective parallel design-implementation cycles</li> <li>c. Neglected backlog maintenance</li> </ul>
<b>Generic</b>	18.	Process Definition Ambiguity	Describes situations where processes or criteria are not clearly defined, leading to confusion or misalignment	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Ambiguous completion criteria</li> <li>b. Undefined checkpoints</li> </ul>
<b>Generic</b>	19.	Quality Assurance Inefficiency	Encompasses challenges and inefficiencies in ensuring the quality of code, designs, or implementations.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Absent code convention checklist</li> <li>b. Delayed testing cycles</li> <li>c. Ineffective code review</li> <li>d. Self-code verification neglect</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	20.	Reactive SaaS Adjustments	The need for users to make changes, fixes, or adaptations due to unexpected or uncommunicated changes made by the SaaS provider.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Adjustments needed due to SaaS alterations</li> </ul>
<b>Generic</b>	21.	Release Management Issues	Denotes difficulties related to managing product releases, updates, or ensuring customers can keep up with the release pace.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Mismatch of customer and product needs</li> </ul>
<b>Generic</b>	22.	Requirement Issues	Refers to problems related to understanding, gathering, or clearly defining requirements.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Inadequate requirement gathering</li> <li>b. Incomplete requirement understanding</li> <li>c. Incomplete requirements</li> <li>d. Requirement consensus lack</li> <li>e. Undefined stakeholder needs</li> <li>f. Vague requirements</li> </ul>

<b>Generic</b>	23.	Requirements and Design Mismatch	Highlights situations where there's a disparity between what's required and the resulting design.	a.	Insufficient design verification/validation
<b>SaaS-Specific</b>	24.	SaaS Configuration Overhead	Challenges related to the extensive setup, tuning, or customization required on the SaaS side. It indicates that the SaaS might have a complex or not have user-friendly configuration setup.	a.	Extensive SaaS-side configurations
<b>SaaS-Specific</b>	25.	SaaS Imposed Limitations	These are strict constraints set by the SaaS provider (such as the number of API calls per hour, storage capacity, customization options, or integration capabilities).	a. b. c.	Limitations imposed by SaaS governor Constraints imposed by SaaS provider Inability to exceed SaaS limitations
<b>SaaS-Specific</b>	26.	SaaS-Induced Modifications	Challenges that arise directly due to changes, updates, or decisions made by the SaaS provider. This can include anything from platform changes to the deprecation of certain features.	a. b. c.	Platform-driven design alterations Release-induced incompatibilities Deprecation-induced disruptions
<b>SaaS-Specific</b>	27.	SaaS-Platform Specific Limitations	Refers to the constraints that are unique to a specific SaaS platform. Salesforce has its own set of limitations distinct such as platform-specific development languages, modules, or unique architectural elements.	a.	Salesforce-specific SaaS constraints
<b>SaaS-Specific</b>	28.	SaaS Testing and Troubleshooting Limitations	Difficulties faced during the testing or troubleshooting phases because of constraints or peculiarities in the SaaS.	b. c.	Testing and troubleshooting issues due to SaaS limits SaaS-related troubleshooting difficulty
<b>SaaS-Specific</b>	29.	Setup and Replication Challenges	Difficulties related to creating, setting up, or duplicating SaaS environments. This can range from initial environment setup to trying to reproduce specific conditions for testing or troubleshooting.	a. b. c.	Time-consuming SaaS environment setup Difficulty in replicating live environments Challenges in customer environment replication
<b>SaaS-Specific</b>	30.	Shared Accountability	This theme pertains to situations where both the software vendor and the development team share the blame for issues or conflicts. It emphasizes that responsibility is not solely on one party.	a.	Accountability on both vendor and development team
<b>Generic</b>	31.	Standards and Best Practices Violation	Represents scenarios where industry standards, best practices, or internal guidelines aren't followed.	b. c. d. e. f. g. h. i.	Absence of architectural standards Absent unit test standards Best practice implementation neglect Flawed testing process Incomplete unit tests Lack of a defined design process Neglect of solid design principles Neglected code conventions

				<ul style="list-style-type: none"> <li>j. Non-conforming code practices</li> <li>k. Undefined test steps</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	32.	Technological Diversity Challenges	Issues that arise due to using a mix of different technologies, tools, or platforms. This might be the integration of varied systems or the problems that arise from them.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Diverse technology hindrances</li> </ul>
<b>Generic</b>	33.	Testing Limitations	Deals with challenges in the testing phase, including time restrictions, missing tests, or lack of automation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Insufficient testing</li> <li>b. Manual testing overhead</li> <li>c. Missed edge case testing</li> <li>d. Missing unit test coverage</li> <li>e. Time-restricted testing</li> </ul>
<b>Generic</b>	34.	Time Management Issues	Encompasses challenges related to deadlines, frequent releases, or general time constraints.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Deadline pressures</li> <li>b. Frequent release pressure</li> <li>c. General time constraints</li> <li>d. Missed deadlines</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	35.	Trade-offs due to SaaS Architecture	Recognizing both the advantages and disadvantages of using a particular SaaS due to its design or structure, especially with architectures like multi-tenancy.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Multi-tenancy-related SaaS trade-offs</li> <li>b. SaaS limits acknowledged, but seen as not positive</li> </ul>
<b>Generic</b>	36.	Verification Inefficiency	Highlights inefficiencies or challenges in the verification phase, whether it's customer or internal verifications.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Customer-identified issues</li> <li>b. Verification difficulties</li> <li>c. Verification-identified issues</li> </ul>
<b>Generic</b>	37.	Workaround Dependencies	Refers to reliance on workarounds, be it due to platform constraints, specific requests, or other limitations.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Limitation workarounds</li> <li>b. Platform-specific workarounds</li> <li>c. Request-specific workarounds</li> </ul>
<b>SaaS-Specific</b>	38.	Workaround for SaaS Limitations	The effort and methods employed to find alternative solutions or bypasses for issues or limits set by the SaaS provider.	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Employing workarounds for SaaS limits/issues</li> </ul>

## 5. Discussions

SaaS applications have recently gained significant interest due to their adaptability and scalability characteristics. These applications can serve to many clients with varying needs. However, this flexibility can contribute to increased TD levels in SaaS projects. In this study, we identified technical debt categories specific to SaaS projects. Our study was not limited to SaaS; we also identified categories of technical debt that apply to generic software development. The SaaS-specific TD categories identified in this study are novel, whereas the generic categories are consistent with prior literature on technical debt. However, these generic TD categories are explained at a finer level of abstraction, thereby providing a deeper understanding of the associated challenges.

### 5.1 SaaS-Specific Technical Debt Indicators and Categories

Technical debt is a well-discussed topic in general software development, but SaaS environments bring their own set of challenges and characteristics. The limitations imposed by SaaS platforms play a significant role in finding

quick solutions and making swift decisions which leading to technical debt. The technical debt categories we specified in this study for SaaS development are;

1. Explorative SaaS Challenges
2. Inadequate SaaS Support
3. Insufficient SaaS Communication
4. Known SaaS-Specific Issues
5. Reactive SaaS Adjustments
6. SaaS Configuration Overhead
7. SaaS Imposed Limitations,
8. SaaS-Platform Specific Limitations
9. SaaS-Induced Modifications
10. SaaS Testing and Troubleshooting Limitations
11. Setup and Replication Challenges
12. Shared Accountability
13. Technological Diversity Challenges
14. Trade-offs due to SaaS Architecture
15. Workaround for SaaS Limitations

Within the technical debt landscape, SaaS-related TD indicators stand out mainly from the characteristics of SaaS platforms. These indicators that range from configuration overheads to platform-specific limitations highlight the balance developers need to ensure between using the benefits of SaaS and managing its inherent constraints.

The *Trade-offs due to SaaS architecture*, *SaaS imposed limitations*, *SaaS platform specific limitations* and *Technological Diversity Challenges* categories are basically related to strict nature of the SaaS platforms. The architectural decisions made during the design and implementation phases of SaaS solutions often lead to inherent trade-offs. By its nature, SaaS usually adopts architectures like multi-tenancy [16]. While this approach offers scalability and maintenance advantages, it can also introduce constraints. For instance, while one tenant (i.e. the client organization) might benefit from a specific feature addition or update, another might find it disruptive. Moreover, customization becomes challenging when trying to adjust to the diverse needs of various tenants without affecting the base architecture. The architectural decisions to use such shared resources might lead to performance bottlenecks or security concerns in SaaS projects. Recognizing these trade-offs is essential to ensure that the advantages of a SaaS solution outweigh its potential limitations. Developers and decision-makers need to be continually be aware of these trade-offs to make informed choices, ensuring that the software remains resilient, secure, and effective.

The SaaS development landscape also involves multiple stakeholders, including SaaS providers, developers, third-party integrators, and end-users [17]. This dynamic nature can lead to situations where no single entity has full ownership of a technical challenge or its resultant debt. The *Shared Accountability* category highlights these blurred lines of responsibility. For instance, a limitation imposed by the SaaS provider might lead the development team to implement a workaround. If this workaround causes performance issues, it would not be clear who is responsible for the issue. This shared accountability can complicate the resolution process and make it challenging to specify the root cause of issues. For effective technical debt management in SaaS projects, it is crucial to establish clear lines of responsibility and communication pathways between all involved parties.

In SaaS projects, the complicated relationship between the *Inadequate SaaS Support*, *Insufficient SaaS Communication*, and *Known SaaS-Specific Issues* categories highlights the shared challenges that developers face. Although there is a close and symbiotic dependence between SaaS providers and developers, this relationship may lean towards a state of imbalance, often leading to the accumulation of technical debt. Even if SaaS providers communicate well, SaaS developers might still have to deal with known problems with the platform. Knowing about these issues does not always make them easy to avoid.

The *Explorative SaaS Challenges* technical debt occurs when developers try innovated operations within the SaaS environment. Whether employing a novel API or integrating a new feature, uncertainties associated with these actions may cause the development team to adopt shortcuts. The absence of established SaaS development guidelines may increase the technical debt levels.

The categories of *Inadequate SaaS Support* and *Insufficient SaaS Communication* often interact hand-to-hand. Insufficient support from SaaS providers may be in the form of limited guidance or insufficient documentation. This can increase the problem by forcing developers into unexpected actions. Especially, poor SaaS provider communication on platform updates, new features or other changes may result in misinterpreted features or misunderstood functionalities, both of which contribute to an increase in technical debt.

Similarly, the *Known SaaS-Specific Issues* and *Reactive SaaS Adjustments* TD categories represent potential challenges that are recognized but may not be readily resolved. Developers may search for quick, reactive code changes to overcome these issues. While such adjustments serve as temporary solutions, they inadvertently contribute to the accumulation of technical debt.

The *SaaS Configuration Overhead, Setup and Replication Challenges* and *SaaS-Induced Modifications* TD categories refer to the additional workload required by the configuration and customization of a SaaS platform to meet particular needs. Especially, a complex configuration structure without sufficient guidance can contribute to the accumulation of technical debt. Lastly, the categories of *SaaS Testing and Troubleshooting Limitations* TD category points to restrictions in effective software verification processes. Impediments in setting up suitable test environments or replicating conditions can lead to less rigorous testing, thereby causing further technical debt. A comprehensive understanding of these areas is critical for effective management of technical debt which is basically comprised of seven stages: Identification, Measurement, Prioritization, Resolution, Monitoring, Communication, and Prevention [7][42]. Awareness of potential technical debt is critical for a well-executed TD management life cycle. For instance, awareness on the *SaaS Configuration Overhead* technical debt category would enable teams to recognize specific type of indicators, making timely and accurate categorization in a SaaS context. This TD categorization will aid in the efficient allocation of resources, accurate issue prioritization for resolving TDs, and facilitate the development of resolution strategies.

### 5.3 Generic Software Technical Debt Categories

Our case study revealed 81 distinct indicators associated with 23 generic technical debt categories, as illustrated in Figure 1. This graph, which includes redundant occurrences, aims to capture the frequency of each technical debt category. From the data, we can note that the top three technical categories are *SaaS-Related Technical Debt* (elaborated in Section 5.1), *Inadequate Technical Debt Management*, and *Violations of Standards and Best Practices*, with 23, 13, and 11 instances respectively.

While Alves *et al.* [28] identified 13 high-level technical debt categories based on a systematic literature review, our study takes this a step further. We provide a deeper level of categorization associated with indicators. We argue that just referencing process names in TD categories does not suffice; each technical debt category should clearly hint potential challenges.

In addition to SaaS related TD categories, our study has highlighted a new area of concern in technical debt: *Inadequate Technical Debt Management*. Neglecting to manage technical debt effectively can have a snowball effect, leading to even more debt. The importance here is not just recognizing how technical debt accumulates but also understanding how to manage it properly. We recommend teams not only be cautious about occurring technical debt but also prioritize its effective management through regular audits, targeted sprints, and long-term planning. Lastly, we find categories like 'Verification Inefficiency' and 'Testing Limitations' to be pivotal. These emphasize the crucial role that verification and testing play in managing technical debt. A lack of rigor in these areas can worsen existing technical problems, making them increasingly complex to identify and resolve.

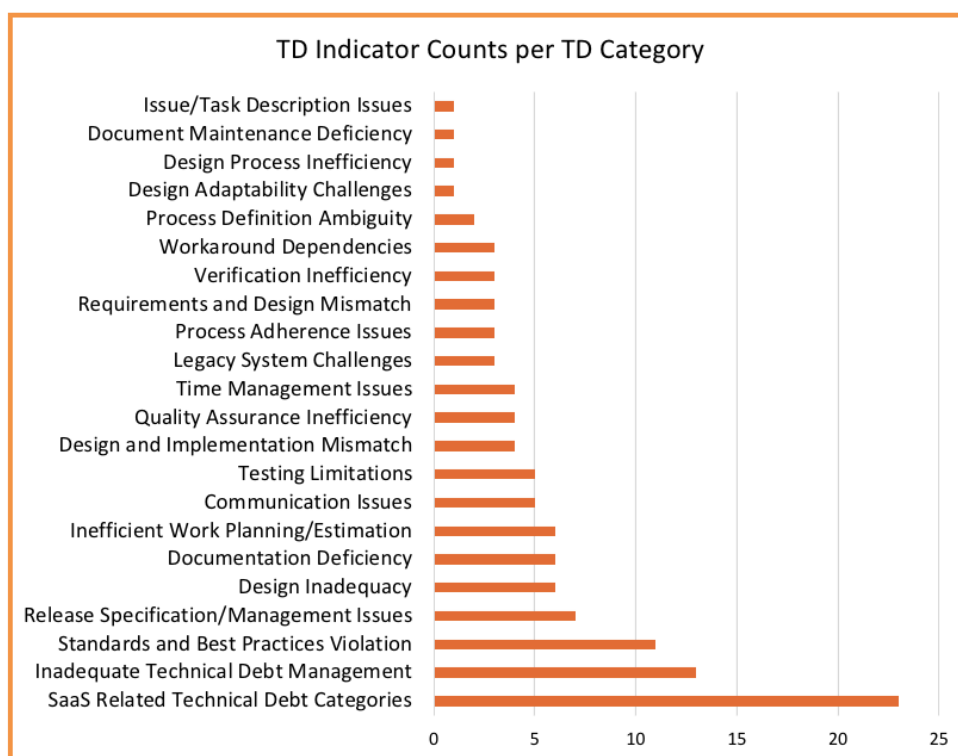


Figure 1. TD indicator counts per TD category

## 6. CONCLUSIONS

While SaaS development holds significant potential and benefits, it comes with its unique challenges. Such challenges highlight the need for a deeper understanding and strategic approach to SaaS development.

In this study, we approached to the problem from technical debt perspective and aimed to understand SaaS-specific technical debt indicators and categories. We performed an exploratory case study by conducting interviews with nine employees in a SaaS vendor. Based on the data we collected from interviewees, we identified 15 distinct SaaS-specific technical debt categories and 23 corresponding indicators. Additionally, we observed 81 generic software-specific technical debt indicators categorized into 23 types.

Addressing SaaS-specific categories is not just about acknowledging their existence, our study points out several categories that are unique to SaaS development. This emphasizes the distinct challenges of SaaS development and the need for specific strategies to manage its technical debt.

These granular categorizations are valuable in terms of enabling developers to identify, prioritize, tackle and prevent SaaS specific issues effectively. Our findings highlight the multifaceted nature of technical debt and stress the need for an encompassing approach to understanding and managing it. Therefore, our study makes a significant contribution for effective management of technical debt in SaaS applications.

Future studies can be performed with multiple case studies and on understanding the impact of SaaS technical debt on the overall software development lifecycle.

## References

- [1] Kendall, J. E., & Kendall, K. E. 1993. Metaphors and methodologies: Living beyond the systems machine. *MIS quarterly*, 149-171.
- [2] Cunningham, W. 1992. The WyCash portfolio management system. *ACM SIGPLAN OOPS Messenger*, 4(2), 29-30.
- [3] Kruchten, P., Nord, R. L., & Ozkaya, I. 2012. Technical debt: From metaphor to theory and practice. *IEEE software*, 29(6), 18-21.
- [4] Codabux, Z., Williams, B. J., Bradshaw, G. L., & Cantor, M. 2017. An empirical assessment of technical debt practices in industry. *Journal of software: Evolution and Process*, 29(10), e1894.
- [5] Tom, E., Aurum, A., & Vidgen, R. 2012. A consolidated understanding of technical debt, *European Conference of Information Systems Proceedings*, <https://core.ac.uk/reader/301355650>.

- [6] Zazworka, N., Spínola, R. O., Vetro', A., Shull, F., & Seaman, C. 2013. A case study on effectively identifying technical debt. In *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering* (pp. 42-47).
- [7] Li, Z., Avgeriou, P., & Liang, P. 2015. A systematic mapping study on technical debt and its management. *Journal of Systems and Software*, 101, 193-220.
- [8] Rios, N., Spínola, R. O., Mendonça, M., & Seaman, C. 2020. The practitioners' point of view on the concept of technical debt and its causes and consequences: a design for a global family of industrial surveys and its first results from Brazil. *Empirical Software Engineering*, 25, 3216-3287.
- [9] Patidar, S., Rane, D., & Jain, P. 2012. A survey paper on cloud computing. In *2<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies* (pp. 394-398). IEEE.
- [10] Sun, W., Zhang, K., Chen, S. K., Zhang, X., & Liang, H. 2007. Software as a service: An integration perspective. In *Service-Oriented Computing Proceedings*, 5, 558-569, Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Benlian, A., & Hess, T. 2011. Opportunities and risks of software-as-a-service: Findings from a survey of IT executives. *Decision support systems*, 52(1), 232-246.
- [12] Gartner Press Release 2022, <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2022-10-31-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-reach-nearly-600-billion-in-2023>, (Access Date: 28.07.2023)
- [13] Turner, M., Budgen, D., & Brereton, P. 2003. Turning software into a service. *Computer*, 36(10), 38-44.
- [14] Vidhyalakshmi, R., & Kumar, V. 2014. Design comparison of traditional application and SaaS. In *2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (pp. 541-544). IEEE.
- [15] Cusumano, M. 2010. Cloud computing and SaaS as new computing platforms. *Communications of the ACM*, 53(4), 27-29.
- [16] Chou, S. W., & Chiang, C. H. 2013. Understanding the formation of software-as-a-service (SaaS) satisfaction from the perspective of service quality. *Decision Support Systems*, 56, 148-155.
- [17] Sadiku, M. N., Musa, S. M., & Momoh, O. D. 2014. Cloud computing: opportunities and challenges. *IEEE potentials*, 33(1), 34-36.
- [18] Brown, N., Cai, Y., Guo, Y., Kazman, R., Kim, M., Kruchten, P., ... & Zazworka, N. 2010. Managing technical debt in software-reliant systems. In *Proceedings of the FSE/SDP workshop on Future of software engineering research* (pp. 47-52).
- [19] Besker, T., Martini, A., & Bosch, J. 2017. The Pricey Bill of Technical Debt: When and by Whom will it be Paid?. *2017 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*.
- [20] Suryanarayana, G., Samarthyam, G., & Sharma, T. 2014. Refactoring for software design smells: managing technical debt. Morgan Kaufmann.
- [21] Falessi, D., & Kazman, R. 2021. Worst smells and their worst reasons. In *IEEE/ACM International Conference on Technical Debt (TechDebt)* (pp. 45-54). IEEE.
- [22] Ramač, R., Mandić, V., Taušan, N., Rios, N., Freire, S., Pérez, B., ... & Spínola, R. 2022. Prevalence, common causes and effects of technical debt: Results from a family of surveys with the IT industry. *Journal of Systems and Software*, 184, 111114.
- [23] Zazworka, N., Izurieta, C., Wong, S., Cai, Y., Seaman, C., & Shull, F. 2014. Comparing four approaches for technical debt identification. *Software Quality Journal*, 22(3), 403-426.
- [24] Iuliia, G. 2017. Technical Debt Management. In *Russian Software Development Companies*. Master's Thesis. St. Petersburg University Graduate School of Management.
- [25] Alzaghoul, E., & Bahsoon, R. 2013. CloudMTD: Using real options to manage technical debt in cloud-based service selection. In *2013 4th International Workshop on Managing Technical Debt (MTD)* (pp. 55-62), IEEE.
- [26] Klinger, T., Tarr, P., Wagstrom, P., & Williams, C. 2011. An enterprise perspective on technical debt. In *Proceedings of the 2nd Workshop on managing technical debt* (pp. 35-38).

- [27] Nugroho, A., Visser, J., & Kuipers, T. 2011. An empirical model of technical debt and interest. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> workshop on managing technical debt, 1-8.
- [28] Alves, N. S., Ribeiro, L. F., Caires, V., Mendes, T. S., & Spínola, R. O. 2014. Towards an ontology of terms on technical debt. In 6<sup>th</sup> International Workshop on Managing Technical Debt (pp. 1-7). IEEE.
- [29] Ramasubbu, N., & Kemerer, C. F. 2016. Technical debt and the reliability of enterprise software systems: A competing risks analysis. *Management Science*, 62(5), 1487-1510.
- [30] Mcconnell, S. 2008. Construx,. Available from: <https://www.construx.com/resources/whitepaper-managing-technical-debt/>. (Access Date: 23.08.2023).
- [31] Fowler, M. 2009. Technical Debt Quadrant, Available from: <http://martinfowler.com/bliki/TechnicalDebtQuadrant.html>. (Access Date: 31.07.2023).
- [32] Kumar, S., Bahsoon, R., Chen, T., & Buyya, R. 2019. Identifying and estimating technical debt for service composition in SaaS cloud. In *2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)* (pp. 121-125). IEEE.
- [33] Agarwal, P. 2011. Continuous Scrum: Agile management of SAAS products. In *Proceedings of the 4th India Software Engineering Conference* (pp. 51-60).
- [34] Liu, F., Tong, J., Mao, J., Bohn, R., Messina, J., Badger, L., & Leaf, D. 2011. NIST cloud computing reference architecture. *NIST special publication*, 500(2011), 1-28.
- [35] Baxter, P., & Jack, S. 2008. Qualitative case study methodology: Study design and implementation for novice researchers. *The qualitative report*, 13(4), 544-559.
- [36] Runeson, P., & Höst, M. 2009. Guidelines for conducting and reporting case study research in software engineering. *Empirical software engineering*, 14, 131-164.
- [37] Easterbrook, S., Singer, J., Storey, M. A., & Damian, D. 2008. Selecting empirical methods for software engineering research. *Guide to advanced empirical software engineering*, 285-311.
- [38] ISO/IEC/ IEEE 12207 2017. Systems and software engineering — Software life cycle processes.
- [39] Patton, M. Q. 2002. Qualitative interviewing, in *Qualitative Research and Evaluation Methods*. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE, pp. 344–347.
- [40] Williams, M., & Moser, T. 2019. The art of coding and thematic exploration in qualitative research. *International Management Review*, 15(1), 45-55.
- [41] Lochmiller, C. R. 2021. Conducting thematic analysis with qualitative data. *The Qualitative Report*, 26(6), 2029-2044.
- [42] Kruchten, P., Nord, R., & Ozkaya, I. 2019. Managing Technical Debt: Reducing Friction in Software Development. Software Engineering Institute.



## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Recovery From Waste Tetra Pak Packages

Mehmet Buğdaycı<sup>1</sup> , Ahmet Turan<sup>2</sup> , Levent Öncel<sup>\*3</sup> , Fatih Bayıroğlu<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, YALOVA

<sup>2</sup> Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği, İSTANBUL

<sup>\*3</sup> Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, SİNOP

(Alınış / Received: 12.09.2023, Kabul / Accepted: 28.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords

Aluminum,  
Tetra Pak,  
Recycling

**Abstract:** In this study, it was aimed to obtain Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from waste Tetra Pak packages by using the hydrometallurgical method. Tetra Pak recycling has become an increasingly researched topic around the world. Cellulose, polyethylene and aluminum, which form the structure of Tetra Pak packages, are raw materials that can be reused after recycling. Cellulose was separated from Tetra Pak's structure by hydropulping process and polyethylene was separated from Tetra Pak's structure by leaching with HCl, and optimum parameters of these processes were investigated in experimental studies. Aluminum in the structure was dissolved in acid solution with 100% efficiency in the experiments carried out with 12.076 M and 9.057 M acid concentration. Aluminum, which was dissolved in acid solution, was obtained as the AlCl<sub>3</sub> phase and precipitated as Al(OH)<sub>3</sub> with the addition of 100% stoichiometric NaOH, and the precipitates were calcined at 950 °C for 1 hour to obtain the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structure. The materials used in the experimental studies and the products obtained as a result of these experiments were analyzed by Atomic Absorption Spectrometry (AAS), Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) / Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and optical microscopy techniques.

## Atık Tetra Pak Paketlerinden Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Geri Kazanımı

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum,  
Tetra Pak,  
Geri dönüşüm

**Öz:** Bu çalışmada atık Tetra Pak ambalajlarından hidrometalurjik yöntem kullanılarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elde edilmesi amaçlanmıştır. Tetra Pak geri dönüşümü, dünya çapında giderek daha fazla araştırılan bir konu haline gelmiştir. Tetra Pak ambalajlarının yapısını oluşturan selüloz, polietilen ve alüminyum, geri dönüştürülerek yeniden kullanılabilen hammaddelerdir. Tetra Pak'ın yapısından selüloz hidropulping prosesi ile, polietilen ise HCl ile liç prosesiyle ayrıştırılmış ve deneysel çalışmalarda bu proseler için optimum parametreler araştırılmıştır. Yapıdaki alüminyum, 12,076 M ve 9,057 M asit konsantrasyonuyla yapılan deneylerde %100 verimle çözülmüştür. Asit çözeltisinde çözünen alüminyum, AlCl<sub>3</sub> fazı olarak elde edilmiş ve %100 stokiometrik NaOH ilavesiyle Al(OH)<sub>3</sub> olarak çöktürülmüştür. Bu çöktürülen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısı elde etmek için 950 °C'de 1 saat kalsine edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin ve bu deneyler sonucunda elde edilen ürünlerin analizleri Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi (AAS), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) / Enerji Saçılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ve optik mikroskopi teknikleriyle gerçekleştirilmiştir.

\*İlgili Yazar, email: leventoncel@gmail.com

### 1. Introduction

One of the biggest challenges faced by the modern world is the efficient use of organic waste consisting of plastic, rubber and solid waste [1]. Besides the recycling of waste, their volume needs to be reduced to create appropriate

storage conditions [2]. The solid waste consists of organic materials, paper, cardboard, plastic, glass, aluminum and other metals [3]. One of these waste materials is Tetra Pak. It is generally called Tetra Pak based on the name of the first manufacturer, and it is widely used as aseptic packages for beverages such as milk and juice [1]. Tetra Pak packages allow perishable products to be stored for 6 months without the need for cooling [4].

Tetra Brik™ aseptic package is produced by Tetra Pak Company and used for packaging after the ultra-pasteurization process. This package consists of six layers mainly made of three materials, and these materials are cellulose (73% by weight), low-density polyethylene (LDPE, 20% by weight) and aluminum (5% by weight). Small amounts of printing ink, coatings and adhesives are also present in the structure (2% by weight) [4,5]. Each component (cellulose, polyethylene, aluminum) of the used Tetra Pak package becomes the raw material for the new product. Considering the environmental effects and limited raw material sources, it is important to recycle these materials without generating waste.

Aluminum is the most produced metallic material after iron and steel [6]. Aluminum is used in industries such as metallurgy, automotive, packaging, electric-electronics, aircraft-space, machine technologies and construction [7]. The densities of iron, copper and zinc are 7.78 g/cm<sup>3</sup>, 8.93 g/cm<sup>3</sup> and 7.14 g/cm<sup>3</sup>, respectively. On the other hand, the density of aluminum is 2.69 g/cm<sup>3</sup>. Due to this advantageous feature, the use of aluminum in industries such as automotive, aerospace and marine industries, where weight is very important, is increasing day by day [8]. The low weight of aluminum reduces fuel consumption, which leads to low CO<sub>2</sub> emissions. Today, 19% of the greenhouse gas emission to the atmosphere originates from the transportation industry [9]. Aluminum's melting point is 660.25 °C, boiling point is 2467 °C, linear thermal expansion coefficient is 2.39E-07 cm/cm/°C (at 0 °C), thermal expansion is 23.1µm/(m.k) (at 25 °C), density is 2.69 g/cm<sup>3</sup>, specific heat is 0.9 J/gK and modulus of elasticity is 76 GPA [10]. Due to these features, aluminum is used in many applications in the industry.

Aluminum can be produced as thin foil, it can be shaped easily, it prevents the passage of water, gas, steam and microorganisms, it is not affected by weather change and the environment, and it is protective against ultraviolet and infrared rays. Therefore, aluminum is used in Tetra Pak packages [1-3].

The mineral used in primary aluminum production is bauxite [11]. Alumina plants are usually built next to bauxite ores. Bauxite ore extracted from the mine is treated with sodium hydroxide melt to obtain aluminum hydroxide. The non-melting residues (red mud) formed as a result of this process are separated and alumina (aluminum oxide) is obtained by calcination of aluminum hydroxide [12]. In this context, the use of alumina is also important. Alumina is used as a raw material in the ceramic industry, glass industry, refractory materials, abrasive material production, primary aluminum production, transparent armor production, and cutting tool insert production [13]. Considering that bauxite ores in the world are limited, to meet the increasing demand for aluminum, different alternatives must be found, and aluminum used in every field must be recycled [12,14]. Tetra Pak packages containing aluminum are recycled by a process called hydropulping [15]. In this process, the separation of the cellulosic fibers takes place in a washing device using a sieve with two chambers. In the two-chamber sieve system, aluminum containing polyethylene is collected in the inner chamber, and pulp (cellulosic fibers) is collected in the outer chamber. In the hydropulping process, thin plastic and aluminum layers are kept in a waterproof membrane and separated from cellulosic fibers by centrifugal forces. The high-quality cellulosic fibers obtained are used in the production of products such as paper towels and writing paper [16]. Low-density polyethylene and aluminum residues are extruded to obtain pellets [15,17]. The utilization of these residues can be carried out by using three different methods. These methods are; i) aluminum recovery in pyrolysis furnaces, ii) recovery of polyethylene and aluminum with plasma technology, iii) processing of polyethylene and aluminum mix to obtain high-quality paper products [5,18]. Tetra Pak pyrolysis is performed in furnaces operating under inert atmosphere conditions at temperatures ranging from 350 °C to 500 °C. The products obtained as a result of pyrolysis are aluminum, gas, oil and coal [19]. Another method used to separate polyethylene and aluminum is plasma technology. In this method, plasma with a temperature of 15000 °C is sprayed to heat the polyethylene and aluminum layers together [20]. The main motivation of this study is to use a method with low energy requirement as an alternative to these methods with high energy requirements.

According to Tetra Pak Company, there is still a lack of infrastructure for the management of the domestic waste disposed of by storage. The global recycling of Tetra Pak packages used increased by 10% in 2012, from 528 tons to 581 tons. The production of recyclable materials with new production methods allows the creation of new companies and official jobs, as well as the use of recycled products. However, inadequate management of waste can pose significant risks for public health and the ecosystem [3]. In this study, in line with these targets, it was aimed to determine the optimum parameters to be used in the recovery of aluminum oxide with HCl acid leach from Tetra Pak packages.

## 2. Material and Method

### 2.1. Material

Waste Tetra Pak packages were used as the aluminum source in this study. Tetra Pak packages were cleaned and contaminations were removed. The dimensions of the cleaned samples were reduced to obtain a homogeneous mixture. Then, the samples, which were reduced in size, were mixed and as a result of this process, a homogeneous structure with the characteristics of all scraps was obtained.

The chemical composition of Tetra Pak scraps, cleaned Tetra Pak scraps, and pelletized Tetra Pak packages in the literature are shown in Table 1.

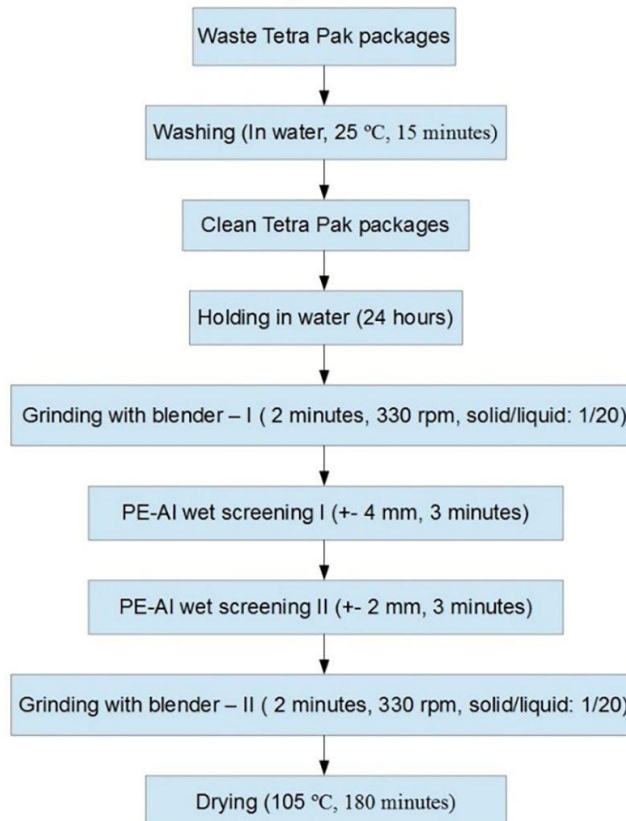
**Table 1.** Compositions of Tetra Pak samples (weight %) [3]

Material	Cellulose	Polythene	Aluminum
Tetra Pak (Scrap)	75	20	5
Tetra Pak (Cleaned)	0	83	17
Tetra Pak (Pellet)	0	95	5

Sigma-Aldrich HCl acid was used to separate the components of the samples. Technical grade NaOH was used to precipitate AlCl<sub>3</sub>, which passed into the acid solution, and aluminum was precipitated in the hydroxide form. Precipitated aluminum hydroxide was calcined to obtain Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 2.2. Method

In the first stage of the experimental studies, PE-Al and cellulose, which are the components of Tetra Pak packages, were separated from each other by the hydropulping process according to the flow chart given in Figure 1. The hydropulping method used by Akoglu et al. was optimized and used [21]. Initially, Tetra Pak packages were cut into squares with an average edge length of 2.5 centimeters, then the mixture was washed with water at room temperature for 15 minutes to remove food residues from the packages. Arcelik K-8140 TB blender was used to perform the grinding process. Then PE-Al and cellulose phases were subjected to wet screening consisting of three steps. In screening and wet screening processes, PE-Al and cardboard phases were separated from each other. The screen used in the first screening step was 4 mm in size and its screen opening was 0.125 mm. In the second screening step, the screen used was 2 mm in size and its screen opening was 0.125 mm.



**Figure 1.** Hydropulping process flow chart

After the cellulose and PE-Al were separated from each other by the hydropulping method, a second process was applied to separate the polyethylene and aluminum. In the second stage of the experimental studies, the optimum parameters for dissolving aluminum in acid solution by treating the obtained PE-Al phase with HCl acid (wt. 37%) were investigated. The experiment sets executed in the second stage were divided into two. In the first set of experiments, the effects of acid molarities on the leaching efficiency were investigated (Table 2).

**Table 2.** Parameters applied in the experiment set investigating the effects of acid molarities in PE-Al separation

Experiment	HCl, ml	H <sub>2</sub> O, ml	Molarity, M
1	15	45	3.019
2	30	30	6.038
3	45	15	9.057
4	60	0	12.076

In the experimental set in question, fixed parameters for 1 g of PE-Al (wt. 18.94% Al), which was used as solid phase, were; 25 °C test temperature (room temperature), 20 minutes leaching time, 450 rpm stirring rate and 1/60 solid to liquid ratio.

In the second set of experiments, in experimental studies carried out at low acid molarities (3.019 M and 6.038 M), the effects of temperature on the leaching efficiency were investigated (Table 3). Experiments were carried out at 35 °C, 45 °C and 55 °C, respectively, based on the HCl acid concentrations used in experiments 1 and 2 (3.019 M and 6.038 M). Fixed parameters in the second set of experiments were 20 minutes leaching time and 450 rpm mixing speed.

In the experimental studies, Equation 1 was used to calculate the leaching efficiency (LE).

$$LE = ((\text{Mass of aluminum passed into acid solution, g}) / (\text{Aluminum quantity in PE} - \text{Al, g})) \times 100 \quad (1)$$

**Table 3.** Experimental parameters used in investigating the effect of temperature on the leaching efficiency in PE-Al separation

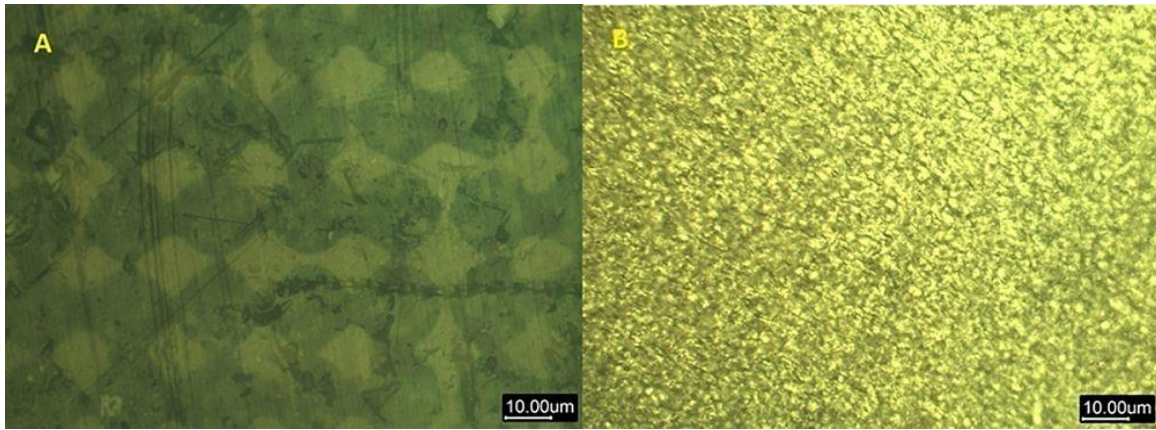
Experiment	HCl, ml	H <sub>2</sub> O, ml	Molarity, M	T, °C
5	15	45	3.019	35
6	15	45	3.019	45
7	15	45	3.019	55
8	30	30	6.038	35
9	30	30	6.038	45
10	30	30	6.038	55

### 2.3. Analysis methods

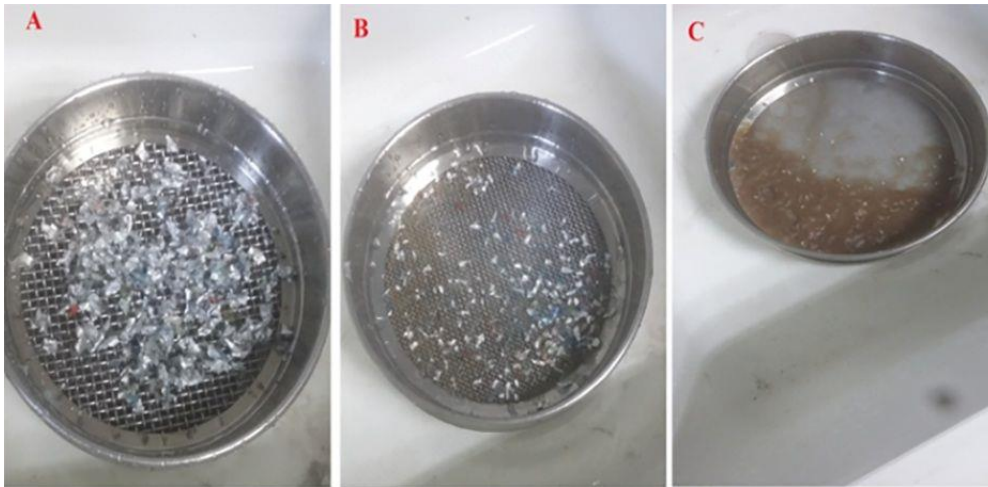
Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (Perkin Elmer Spectrum 100) was used to understand the structure of precipitates. FEI Inspect S50 Scanning Electron Microscope (SEM) and EDAX Octane Prime Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) were used to examine the crystallographic structures of the samples. Optical microscope micrographs of the prepared samples were taken with the LEICA Optical Microscope before the hydropulping process. Chemical analyses were performed with Perkin Elmer AAnalyst 800 Atomic Absorption Spectrometer (AAS).

### 3. Results and Discussion

In the first stage of the experimental studies to obtain aluminum from waste Tetra Pak packages, cellulose / PE-Al mix was separated from each other by hydropulping process carried out in accordance with the flow chart shared in Figure 1. Before this process, optical microscope micrographs were taken to observe that if samples were completely free from contaminants. Optical microscope micrographs are given in Figure 2. As seen in Figure 2, there were no contaminants on the inner and outer surfaces of the samples, and there was metallic aluminum on the inner surface. The PE-Al residues obtained after the hydropulping process are shown in Figure 3. It is seen that the samples were completely free from cellulose.



**Figure 2.** Optical microscope micrographs of the Tetra Pak package; a) the outer layer of the Tetra Pak package (layer with the pattern on it), b) the inner layer of the Tetra Pak package



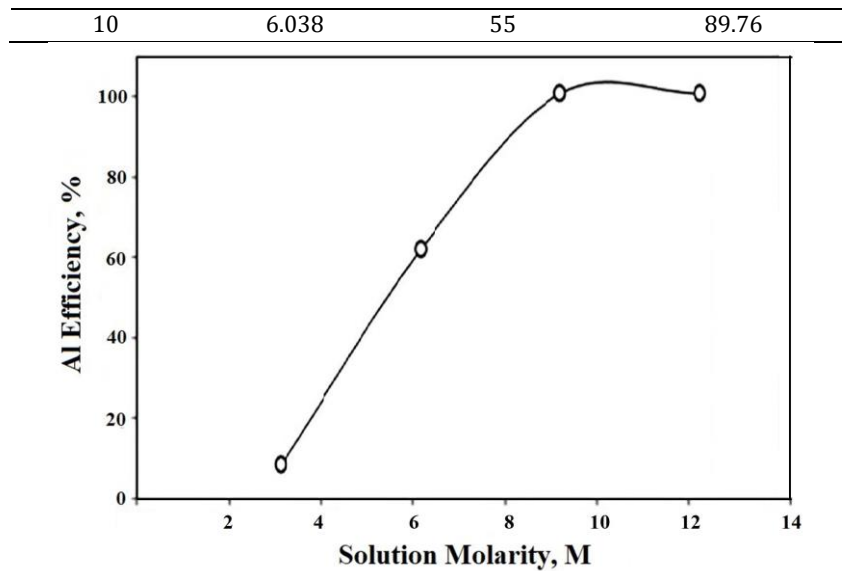
**Figure 3.** End products obtained as a result of hydropulping process; a) PE-Al phase, b) cellulose pulp and PE-Al phase, c) cellulose pulp

The content of the PE-Al phase was measured by the chemical analysis method. As a result of the analysis, it was determined that the chemical content of the material was 79.92% polyethylene and 20.08% aluminum by weight. The average width of the PE-Al lamels was found to be 1.9 mm.

In the second stage, the process of separating Al from the PE-Al layer, which was separated from cellulose in the first stage, was carried out hydrometallurgically. Experiments of dissolving aluminum in acid solution were executed at room temperature for the increasing acid molarities, and increasing temperatures for low acid molarities. When the experiment results were examined, it was determined that the amount of aluminum dissolved in acid solution increased with increasing acid molarity. The results are seen in Figure 4 and Table 4. When Figure 4 is examined, it is seen that the leaching efficiency was over 100% at 9.057 M and 12.076 M acid concentrations. This is due to the probability of relatively low pulse and low homogeneity of the sample which was weighed as 1 g. This situation is defined as the ingot effect in metallurgy and is frequently encountered in the analysis of Au-Ag ores. Therefore, experiments at 9.057 M and 12.076 M acid concentrations, where 100% efficiency was exceeded, provided sufficient conditions. Sufficient conditions were those where 100% efficiency was achieved.

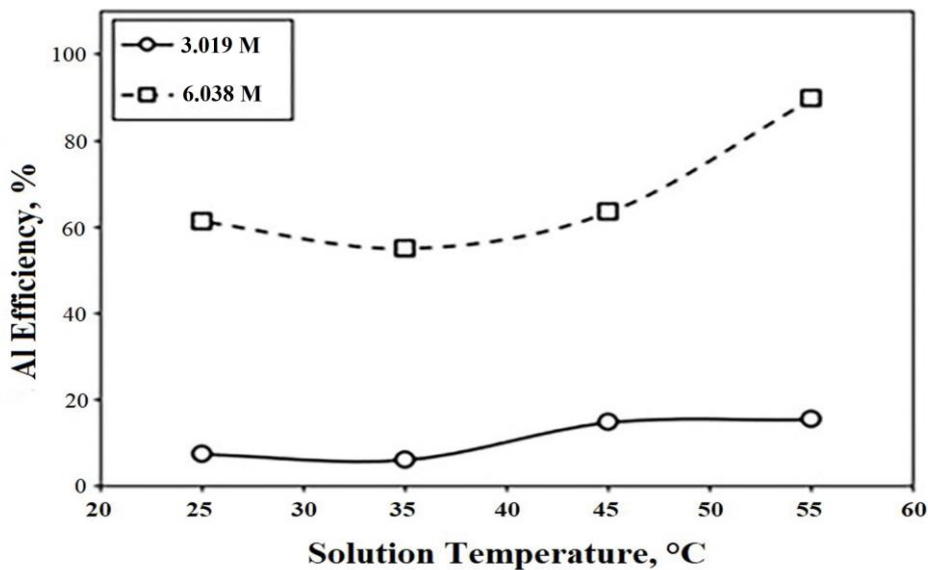
**Table 4.** The effects of HCl acid molarity and temperature on the leaching efficiency of aluminum

Experiment	Molarity	Temperature, °C	Al leaching efficiency, %
1	3.019	25	7.40
2	6.038	25	61.25
3	9.057	25	100.00 (116.68)
4	12.076	25	100 (100.42)
5	3.019	35	6.07
6	3.019	45	14.78
7	3.019	55	15.42
8	6.038	35	54.96
9	6.038	45	63.41



**Figure 4.** The effect of HCl acid molarity on the leaching efficiency of aluminum

To increase the leaching efficiency of aluminum at 3.019 M and 6.038 M acid concentrations, experiments were repeated at higher temperatures and the same molarity values, and the results were shared in Figure 5. It was observed that the leaching efficiency of aluminum increased with increasing experiment temperatures. The highest efficiency in this set of experiments was obtained as 89.76% at 55 °C, which was the highest temperature used in the experiments. In experiments carried out at an acid concentration of 3.019 M, it was determined that the leaching efficiency of aluminum did not exceed 20% despite the increase in temperature. According to these data, it was determined that the acid molarity of the solution must be 6.038 M as a minimum.



**Figure 5.** The effect of temperature on the leaching efficiency of aluminum

In the studies conducted, Atomic Absorption Spectrometer (AAS) was used to detect the remaining Al in PE-Al samples which were treated with HCl. According to the analyses results, there was no aluminum in the composition of the cakes when the molar concentration of HCl acid was high, but there was a small amount of aluminum left in the system when the molar concentration of HCl acid was low (3.019 M HCl and 6.038 M HCl).

It was seen that aluminum reacting stoichiometrically with HCl, which was used in high concentrations, could easily transform into AlCl<sub>3</sub> as seen in Equation 2, then AlCl<sub>3</sub> dissolved and passed into liquid phase, and for that reason, it was not present in the cake phase.



According to the reaction mechanism, excess material of the reaction between high concentration HCl and Al was HCl. Therefore, it was thought that all of the aluminum was used during the reaction and formed AlCl<sub>3</sub>, and AlCl<sub>3</sub> passed to the raffinate phase with the remaining HCl. For this reason, there was no aluminum in leach cake in leaching experiments performed at high concentrations of HCl.

However, when the molarity of the acid was low (3.019 M HCl and 6.038 M HCl), it was thought that the amount of HCl reacting with aluminum was not enough for the reaction to occur 100% stoichiometrically, and therefore aluminum was not completely used. Thus, aluminum was found in the filter cake obtained after leaching. In addition, due to the large number of water molecules resulting from low concentration of HCl, formed AlCl<sub>3</sub> could react with excess H<sub>2</sub>O in the medium in accordance with Equation 3.

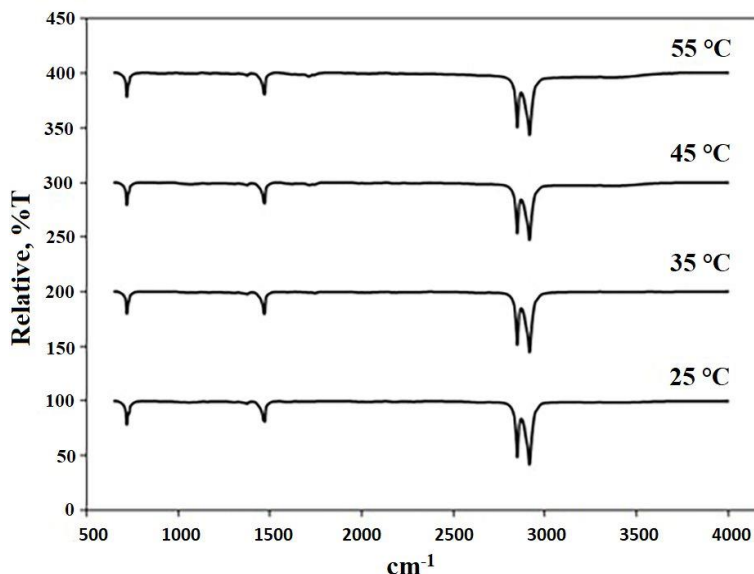


Due to the precipitated aluminum hydroxide as a result of the reaction occurred, the aluminum phase was determined in the leach cake in the process performed at a low concentration of HCl solution. Also, if there is excess water molecule in the media, it forms aluminum oxide salt with the following reaction mechanism (Equation 4).



The aluminum oxide salt formed as a result of this reaction also precipitates, and this causes the leach cake to contain aluminum. Leaching operations were carried out at high temperatures to remove aluminum, which was seen at low molarity values, but aluminum found in leach cake could not be dissolved in acid solution. The reason for this is the low solubility constants of Al(OH)<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, which are compounds predicted to occur by the reaction mechanisms described above, therefore by increasing the temperature, the solubility does not reach the level to pass the raffinate phase.

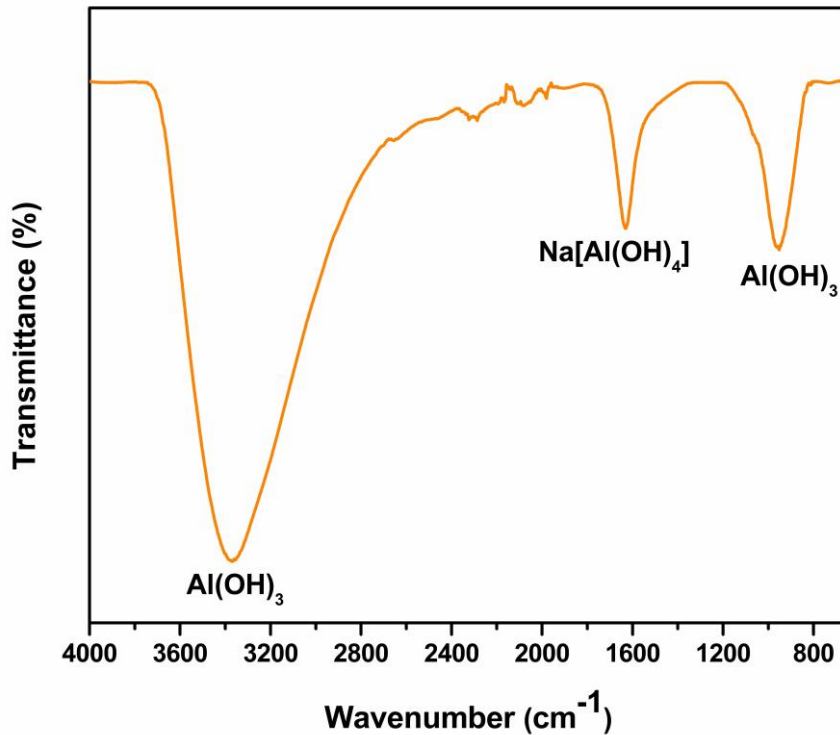
The structure of the polyethylene separated from aluminum by the hydrometallurgical process was characterized by the FTIR method and the results are given in Figure 6.



**Figure 6.** FTIR patterns of filter cakes obtained from experimental studies carried out with 6.038 M HCl and increasing temperatures

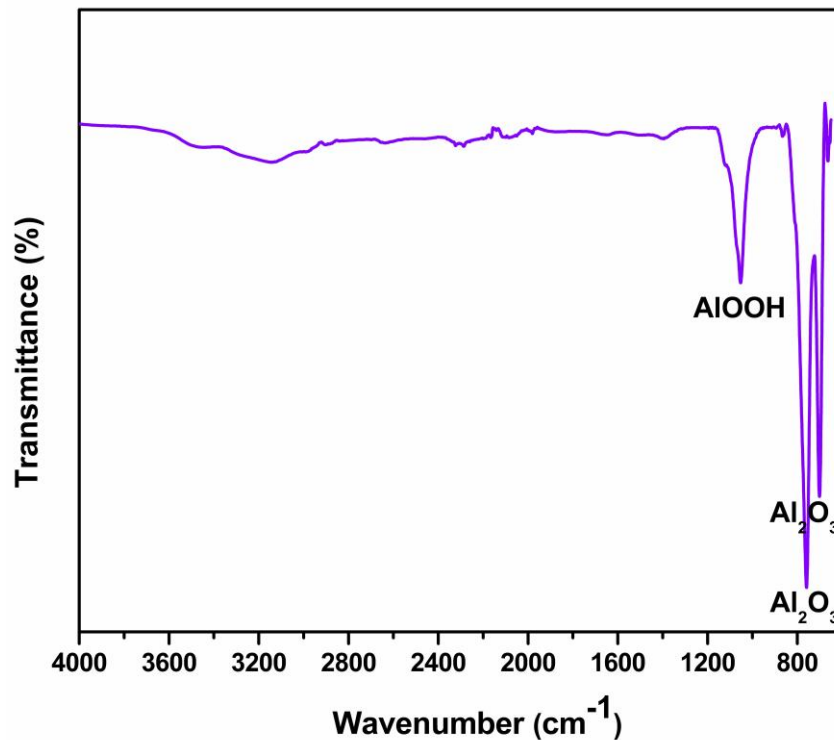
According to Figure 6, no impurities based on Al or other structures were found in the structure of the polyethylene obtained as a result of leaching with 6.038 molar HCl solution. Accordingly, for the solution having 6.038 M acid concentration, it was determined that at every temperature used in the experiments, aluminum was dissolved in acid solution at a high rate and completely separated from polyethylene. After determining the leaching efficiencies of aluminum, the solution with the best efficiency (25 °C, 9.057 M HCl acid concentration) was prepared and PE-Al was dissolved in acid solution under optimum conditions. 100% stoichiometric ratio of NaOH was added to the aluminum which was dissolved in acid solution and AlCl<sub>3</sub> was precipitated in Al(OH)<sub>3</sub> form. In this process, pH should be adjusted to 7. Whether the solution is acidic or basic prevents precipitation, since Al tends to remain in solution in both cases. FTIR analysis result of Al(OH)<sub>3</sub> obtained as the result of precipitation is

shown in Figure 7. It is seen in the figure that Al(OH)<sub>3</sub> was successfully precipitated. However, it was determined that there was some amount of precipitated Na[Al(OH)<sub>4</sub>] in the structure because of NaOH.



**Figure 7.** FTIR pattern obtained by adding NaOH to filter cakes in experimental studies carried out with 9.057 M HCl and 25 °C of temperature

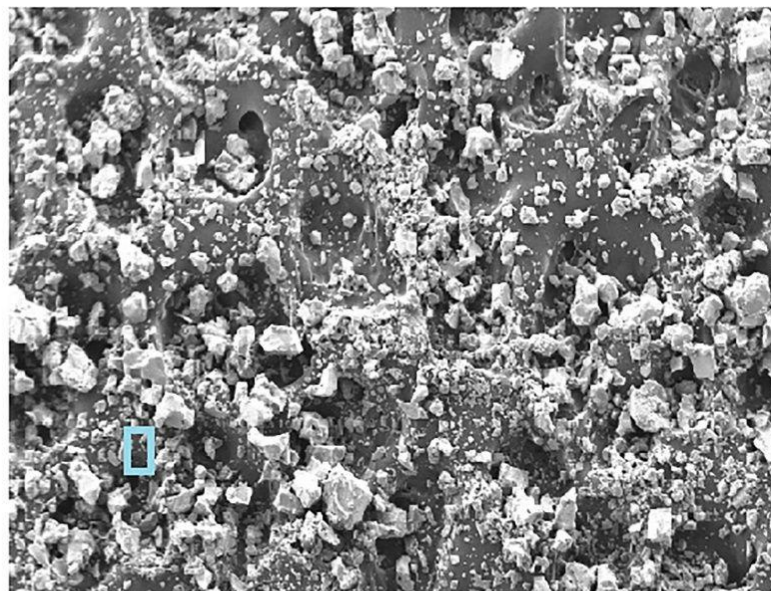
After the precipitation process, the calcination process was carried out to obtain Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from Al(OH)<sub>3</sub>. In the calcination process, samples were calcined at 950 °C for 1 hour, and the FTIR pattern of the obtained products is shown in Figure 8. When Figure 8 is examined, it was determined that Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was successfully obtained and some amount of aluminum hydroxide remained in the structure.



**Figure 8.** FTIR pattern of calcined Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



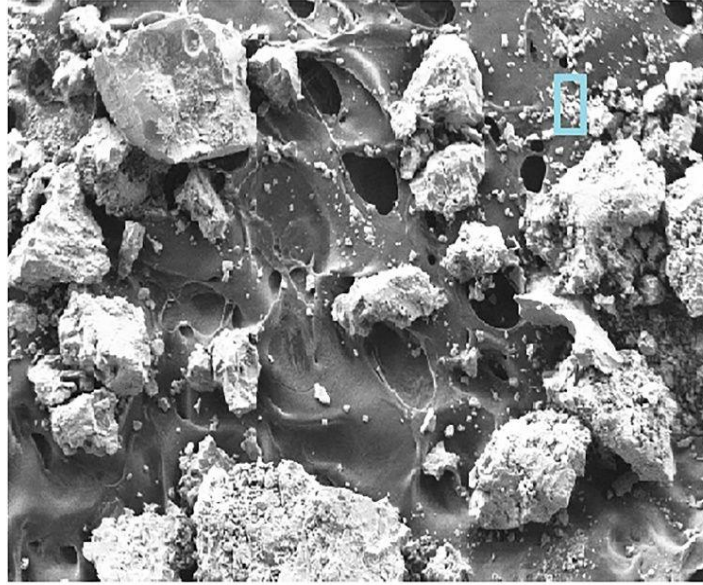
SEM analyses were performed to examine the microstructures of precipitated and calcined samples. The SEM image of Al(OH)<sub>3</sub> is seen in Figure 9, and the EDS analysis is given in Table 5. The SEM image of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtained as a result of calcination is seen in Figure 10, and the EDS analysis is shared in Table 6. EDS analysis shared in Table 5 shows that a low amount of sodium remained in the structure in parallel with the FTIR results. According to the results of EDS analysis shared in Table 6, as a result of the calcination process; Na could not be eliminated, the amount of H, which was 36.60%, decreased to 3.37% and the amount of O<sub>2</sub> increased from 21.04% to 42.95%. According to these data, it was determined that Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was obtained successfully.



**Figure 9.** SEM image of Al(OH)<sub>3</sub>

**Table 5.** EDS analysis of Al(OH)<sub>3</sub>

Element	keV	Mass %	Sigma	Atom %
Al	1.486	37.56	0.59	51.47
O	0.525	21.04	0.27	20.06
Na	1.041	4.80	0.23	12.02
H	2.621	36.60	0.24	16.45
Total		100.00		100.00



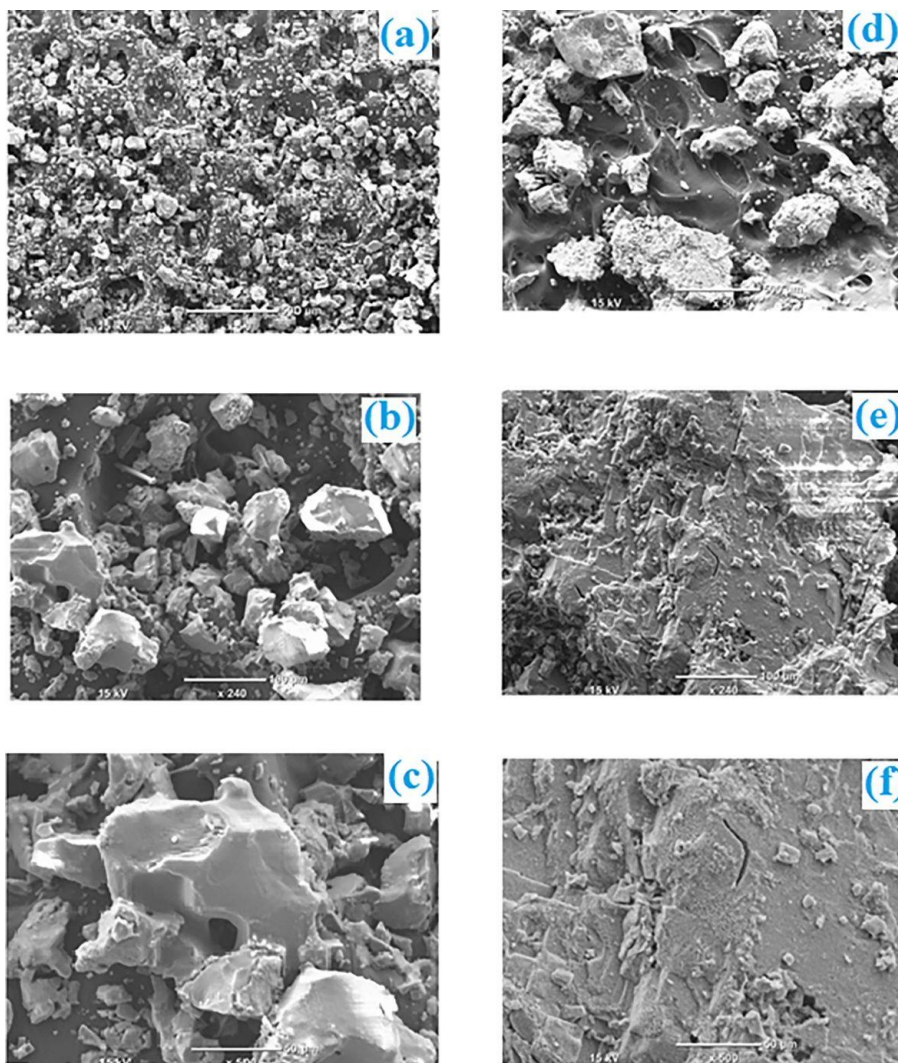
2,0 mm

Figure 10. SEM image of calcined Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Table 6. EDS analysis of calcined Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Element	keV	Mass %	Sigma	Atom %
Al	1.486	52.65	0.40	55.94
O	0.525	42.95	0.19	42.47
Na	1.041	1.03	0.17	0.21
H	2.621	3.37	0.18	1.38
Total		100.00		100.00

Figure 11 shows the SEM images of Al(OH)<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at different magnifications. It is seen in the figure that the hydroxide structure turns into a finer oxide structure as a result of the transformation from Al(OH)<sub>3</sub> to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Figure 11.** SEM images of Al(OH)<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at different magnifications; a) Al(OH)<sub>3</sub> at 50X magnification, b) Al(OH)<sub>3</sub> at 240X magnification, c) Al(OH)<sub>3</sub> at 500X magnification, d) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 50X magnification, e) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 240X magnification, f) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at 500X magnification

#### 4. Conclusion

In this study, optimum parameters for obtaining Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from waste Tetra Pak packages were determined by carrying out experimental studies.




- Waste Tetra Pak samples were purified from cellulose and contaminants by subjecting to the hydropulping process, then HCl acid leaching was applied, and aluminum was separated from polyethylene by dissolving in acid solution.
- In the experiment carried out with the parameters of 12.076 M acid concentration, 25 °C temperature and 400 rpm stirring rate, aluminum was completely dissolved in acid solution, and was obtained as the AlCl<sub>3</sub> phase.
- Then, Al(OH)<sub>3</sub> precipitation was acquired with stoichiometrically 100% NaOH addition. The Al(OH)<sub>3</sub> precipitate was calcined at 950 °C for 1 hour, and the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structure was successfully obtained.

#### References

- [1] Haydari, J., Susa, D., Dudás, J. 2013. Pyrolysis of aseptic packages (tetrapak) in a laboratory screw type reactor and secondary thermal/catalytic tar decomposition. *Waste Management*, 33(5), 1136-1141.
- [2] Solak, A., Rutkowski, P. 2014. The effect of clay catalyst on the chemical composition of bio-oil obtained by co-pyrolysis of cellulose and polyethylene. *Waste Management*, 34(2), 504-512.
- [3] Rodríguez-Gómez, J.E., Silva-Reynoso, Y.Q., Varela-Guerrero, V., Núñez-Pineda, A., Barrera-Díaz, C.E. 2015. Development of a process using waste vegetable oil for separation of aluminum and polyethylene from Tetra Pak. *Fuel*, 149, 90-94.
- [4] Hidalgo-Salazar, M.A. 2011. Manufacturing rigid board by packaging waste containing aluminum and polyethylene. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 70(3), 232-234.

- [5] Abreu, M. Recycling of tetra pak aseptic cartons. <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/0/articles/2268/tetrapak.pdf> (Accessed 01.04.2022).
- [6] Zhang, M., Kamavaram, V., Reddy, R.G. 2003. New electrolytes for aluminum production: ionic liquids. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 55, 54-57.
- [7] Satish Reddy, M., Neeraja, D. 2018. Aluminum residue waste for possible utilisation as a material: a review. *Sadhana*, 43, 124.
- [8] Capuzzi, S., Timelli, G. 2018. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review. *Metals* 8(4), 249.
- [9] Araghchi, M., Mansouri, H., Vafaei, R., Guo, Y. 2018. Optimization of the Mechanical Properties and Residual Stresses in 2024 Aluminum Alloy Through Heat Treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 3234–3238.
- [10] Senel, M.C., Gurbuz, M., Koc, E. 2015. New generation composites with graphene reinforced aluminum matrix. *Journal of Engineers and Machinery*, 56, 36-47.
- [11] Balomenos, E., Panias, D., Paspaliaris, I. 2011. Energy and exergy analysis of the primary aluminum production processes: A review on current and future sustainability. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 32(2), 69-89.
- [12] Poulimenou, N.I., Giannopoulou, I., Panias, D. 2015. Use of ionic liquids as innovative solvents in primary aluminum production. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(12), 1403-1407.
- [13] Atik, E. 1998. Mechanical properties and wear strengths in aluminium-alumina composites. *Materials and Structures*, 31, 418-422.
- [14] Hind, A.R., Bhargava, S.K., Grocott, S.C. 1999. The surface chemistry of Bayer process solids: A review. *Colloids Surf. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 146(1-3), 359-374.
- [15] Ayırlımış, N., Kaymakci, A., Akbulut, T., Elmas, G.M. 2013. Mechanical performance of composites based on wastes of polyethylene aluminum and lignocellulosics. *Composites Part B: Engineering*, 47, 150-154.
- [16] Lopes, C.M.A., Felisberti M.I. 2006. Composite of low-density polyethylene and aluminum obtained from the recycling of postconsumer aseptic packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 3183-3191.
- [17] Alvarenga, L.M., Xavier, T.P., Barrozo, M.A.S., Bacelos, M.S., Lira, T.S. 2012. Analysis of reaction kinetics of carton packaging pyrolysis. *Procedia Engineering*, 42, 113-122.
- [18] Kaiser, K., Schmid, M., Schlummer, M. 2018. Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3, 1.
- [19] Siddiqui, M.Z., Han, T.U., Park, Y.K., Kim, Y.M., Kim, S. 2020. Catalytic pyrolysis of tetra pak over acidic catalysts. *Catalyst*, 10(6), 602.
- [20] Korkmaz, A., Yanik, J., Brebu, M., Vasile, C. 2009. Pyrolysis of the tetra pak, *Waste Management*, 29(11), 2836-2841.
- [21] Akoglu, B., Azgi, K., Ozpekturk, A., Incir, S., Copur, M., Turan, A. 2016. Production of Polyethylene – Aluminum Composites from Waste Tetra Pak Packages. *IMMC 2016, 18th International Metallurgy & Materials Congress*, 29 September – 1 October, Istanbul, 359-362.

## Electrochemical Profiling of a Promising Fused Pyrimidine-Triazole Drug Candidate

Fatma Kurul<sup>1,2</sup> , Hüseyin Istanbulu<sup>3</sup> , Seda Nur Topkaya<sup>\*4</sup> 

<sup>1</sup>İzmir Biyotıp ve Genom Merkezi, İZMİR

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Uluslararası Biyotıp ve Genom Enstitüsü Biyotıp ve Sağlık Teknolojileri, İZMİR

<sup>3</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Farmasötik Kimya Anabilim Dalı, İZMİR

<sup>\*4</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Anabilim Dalı, İZMİR

(Alınış / Received: 19.09.2023, Kabul / Accepted: 27.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords

Drug Candidate,  
Pencil Graphite Electrode,  
Drug-DNA Interaction,  
Triazolopyrimidinone

**Abstract:** In this study, a novel triazolopyrimidinone derivative, 5-(Chloromethyl)-2-(2-chlorophenyl)-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7(3H)-one, abbreviated CMCP, was synthesized as a viable therapeutic candidate. Using electrochemical techniques such as Differential Pulse Voltammetry (DPV) and Cyclic Voltammetry (CV), we investigated its electrochemical characteristics and interactions with both single-stranded DNA (ssDNA) and double-stranded DNA (dsDNA). We explored the experimental parameters, including pH, concentration and scan rate to provide best analytical results. Our methodology involves analyzing changes in electrochemical signals, specifically the peak current of guanine bases, before and after interactions with the drug. Furthermore, stability tests were performed on CMCP over several days. The results unveiled noteworthy changes in guanine bases following CMCP interactions with both ssDNA and dsDNA, underscoring the potential influence of this compound on DNA structure.

## İlaç Adayı olarak Yeni Sentezlenen Pirimidin- Triazole Yapılı Bir Bileşiğin Elektrokimyasal Yapısının İncelenmesi

### Anahtar Kelimeler

İlaç Adayı,  
Kalem Grafit Elektrot,  
İlaç-DNA Etkileşimi,  
Triazolopyrimidinon

**Öz:** Bu çalışmada, umut vadeden yeni bir ilaç adayı olarak triazolopyrimidinone türevi olan 5-(klorometil)-2-(2-klorofenil)-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pirimidin-7(3H)-on (kısaltılmış olarak CMCP) sentezlenmiştir. Diferansiyel Puls Voltametri (DPV) ve Döngüsel Voltametri (CV) gibi elektrokimyasal teknikler kullanılarak, elektrokimyasal özellikleri, ayrıca tek sarmal DNA (ssDNA) ve çift sarmal DNA (dsDNA) ile etkileşimleri araştırılmıştır. Optimum sonuçlar sağlamak için pH, konsantrasyon ve tarama hızı gibi çeşitli deneysel parametreler araştırılmıştır. Çalışmada, ilaçla etkileşimden önce ve sonra guanin bazlarının pik akımı gibi elektrokimyasal sinyallerdeki değişiklikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, CMCP üzerinde birkaç gün boyunca kararlılık testleri yapılmıştır. Sonuçlar, CMCP'nin hem ssDNA hem de dsDNA ile etkileşiminden sonra guanin bazlarında dikkat çekici değişiklikler olduğunu ortaya koymuştur ve bu bileşiğin DNA yapısı üzerindeki potansiyel etkisini vurgulamaktadır. Bu deneysel bulgular, CMCP'nin DNA üzerindeki etkisi nedeniyle ilerideki ilaç geliştirme çalışmaları için umut vadeden bir aday olduğu görüşünü desteklemektedir.

\*İlgili Yazar, email: sedanur6@gmail.com

## 1. Introduction

Heterocyclic compounds, a versatile class of organic compounds, have attracted considerable attention due to their significant impact on the field of chemistry and their wide-ranging applications [1,2]. The most prevalent heterocycles typically consist of five- or six-membered rings and incorporate heteroatoms such as nitrogen (N), oxygen (O), or sulphur (S) [3]. Nitrogen-containing heterocyclic compounds are a key component of many natural products, drug molecules, and organic functional materials [4]. Triazolopyrimidinone, a fused pyrimidinone-triazole heterocyclic compound, has been the subject of extensive research in various fields. These compounds have exhibited a broad spectrum of activities, encompassing antibacterial [5], antifungal [6], antiviral [7], anticancer [8] and antimicrobial agents [9]. They also highlight the potential of triazolopyrimidinones to be used as starting points for the development of novel drugs for the treatment of these and other diseases [10-12].

DNA is the most popular pharmacological target of many drugs because it is essential for all cellular processes [13]. The interaction between drugs and DNA is important in medicine because they influence both therapy and potential side effects. Understanding these interactions is critical for creating more effective treatments and safer drugs. Investigating the mechanisms underlying drug-DNA interactions not only provides insights into pharmacological effects, but it also paves the way for novel DNA-targeted drug design [14]. DNA-drug interactions are unravelled using a variety of techniques, including optical and infrared spectroscopy, Nuclear Magnetic Resonance (NMR), circular and linear dichroism, viscosity assays, Mass Spectrometry (MS), molecular docking, and electrochemical methods. These techniques provide valuable insights into the pharmacological effects of drugs and the molecular mechanisms of disease [15-18]. Electrochemical methods, such as Cyclic Voltammetry (CV) and Differential Pulse Voltammetry (DPV), offer a unique window into the dynamic interrelationship between drugs and DNA molecules [19]. The advantages of electrochemical approaches include their portability, simplicity, and quickness. Despite the complexity of the samples, their high selectivity assures precise identification of the target analytes, and their sensitivity allows for the detection of trace quantities. Cost-effectiveness is one of their main advantages because it makes them available for routine analysis [20].

In this study, the electrochemical characteristics of 5-(Chloromethyl)-2-(2-chlorophenyl)-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7(3H)-one, CMCP, a triazolopyrimidinone derivative and its interactions with both single-stranded DNA (ssDNA) and double-stranded DNA (dsDNA) were investigated using DPV and CV. (depicted in Figure 1). The objective of this study is to contribute to the ongoing development of innovative therapeutic compounds. Specifically, attention was directed towards the novel potential drug candidate CMCP, which is recognized for its triazolopyrimidinone structure, and a comprehensive examination of its electrochemical properties was conducted. Various experimental parameters, such as pH, concentration and scan rate were systematically explored using DPV. Additionally, critical parameters such as reproducibility, precision, linearity, as well as the limits of detection (LOD) and limits of quantification (LOQ) were determined. CMCP stability and interaction with ssDNA and dsDNA were assessed under optimal storage conditions (dark room at 25°C) on specific days (day 0, day 1, day 3, day 7, and day 30). DPV was used to monitor changes in guanine bases, which are essential for DNA structure and function. The significant alterations in guanine bases observed following CMCP interaction with ssDNA and dsDNA highlight the crucial nature of these findings.

## 2. Material and Method

### 2.1. Apparatus

Analytical Thin Layer Chromatography (TLC) was conducted using Merck silica gel F-254 plates. The melting points were determined employing the Stuart SMP 30 melting point apparatus (Staffordshire, ST15 OSA, United Kingdom). These melting point measurements were conducted in open capillary tubes. The synthesis of the compounds through microwave irradiation (MW) was performed utilizing the Milestone MicroSYNTH (Milestone S.r.l., Italy) microwave apparatus. The SimpliAmp™ Thermal Cycler (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA) was used to apply temperature cycles in a controlled and accurate manner, allowing dsDNA denaturation and the separation of the two DNA strands in the sample. The Heating Thermoshaker (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA) was employed for various tasks, including incubating samples at specific temperatures and gently mixing samples while maintaining precise temperature control. A PalmSens4 potentiostat/galvanostat/impedance analyser was used for all DPV and CV measurements. The PalmSens4 was connected to a computer via a USB cable and controlled using the PStace 5.8 program. A three-electrode system was used in the experiment, with a pencil graphite electrode (PGE) as the working electrode, an Ag/AgCl reference electrode, and a platinum wire counter electrode. The graphite lead was held in place with a Rotring T 0.5 mm pencil (Rotring, Germany). A local bookstore provided HB pencil leads (Tombo, Japan) measuring 60 mm in length and 0.5 mm in diameter. A conductive cable was attached to the metallic part of the pencil to provide electrical connection between the graphite lead and the holder.

## 2.2. Chemicals

Ethanol absolute (99.9%) and glacial acetic acid were acquired from Isolab Chemicals. Double-stranded salmon sperm DNA (dsDNA) was procured from Sigma Chemical Co. (St. Louis, USA), while all other chemicals were sourced from reputable suppliers, including Merck (Darmstadt, Germany), Tokyo Chemical Industry Co. LTD. (Tokyo, Japan), Alfa Aesar-Acros Organics (Thermo Fisher Scientific), and Carlo Erba Reagents (Milano, Italy), ensuring their high purity. Solvents used were of analytical grade and were used as received without additional purification.

Various buffers, such as 0.5 M Acetate (ACB) at pH levels of 3.8, 4.8, and 5.6, 0.05 M Phosphate (PBS) at pH 7.4, 0.1 M sodium borate (BBS) at pH levels of 8.2 and 9.8, as well as 0.02 M NaCl and 0.05 M Tris-EDTA (TE) buffer at pH 8.0, were employed in the experiments. CMCP was synthesized at Izmir Katip Celebi University, Faculty of Pharmacy, Department of Pharmaceutical Chemistry, and generously provided. A stock solution of CMCP was prepared in Dimethylformamide (DMF) and stored in a dark room at 4°C to prevent degradation.

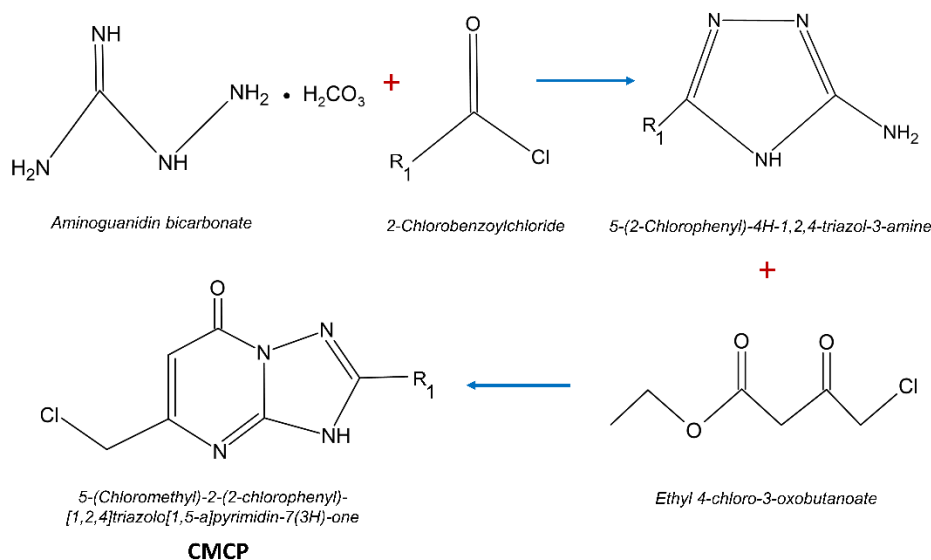
## 2.3. Experimental

### 2.3.1. Synthesis of CMCP

Triazolopyrimidinones are attainable through a range of chemical processes, such as cycloaddition, condensation, and cyclization reactions. These reactions generally involve the combination of appropriate precursor compounds to create the triazole and pyrimidinone rings. 5-(2-chlorophenyl)-3-amino-1,2,4-triazole (10 mmol) and ethyl 4-chloroacetoacetate (20 mmol) in 12-18 ml acetic acid (MW, 20 min, 180°C) was refluxed. The formed solid was filtered off, washed with acetic acid then dried to yield **CMCP**. Compound **CMCP** (5-(Chloromethyl)-2-(4-methoxyphenyl)-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7(3H)-one) used in the next step without purification.

#### 5-(Chloromethyl)-2-(2-chlorophenyl)-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7(3H)-one (CMCP).

Yellow solid; yield, 52 %; m.p., 113 °C; <sup>1</sup>H-NMR (DMSO-d<sub>6</sub>, 400 MHz) δ 8.02 (d, J = 8.7 Hz, 2H), 7.07 (d, J = 8.8 Hz, 2H), 6.16 (s, 1H), 4.66 (s, 2H), 3.81 (s, 3H) ppm; <sup>13</sup>C-NMR (DMSO-d<sub>6</sub>, 100 MHz) δ 161.6, 156.1, 151.8, 128.7, 114.8, 100.4, 55.8 ppm; HRMS m/z: 290.0555 (Calcd for (C<sub>13</sub>H<sub>11</sub>ClN<sub>4</sub>O<sub>2</sub>), 290.0571). We reported HRMS data to within 5 µg/mL to support molecular formula and purity assignment.



**Figure 1.** General synthesis scheme of the pyrimidinone-triazole derivative: CMCP.

### 2.3.2. Pre-treatment of PGE

In preparation for our experiments, the pencil graphite electrodes (PGEs) were activated by applying a potential of +1.4 V for a duration of 30 seconds within ACB at pH 4.8. The primary objective of this activation was to minimize background current, thereby enhancing the precision of subsequent electrochemical measurements.

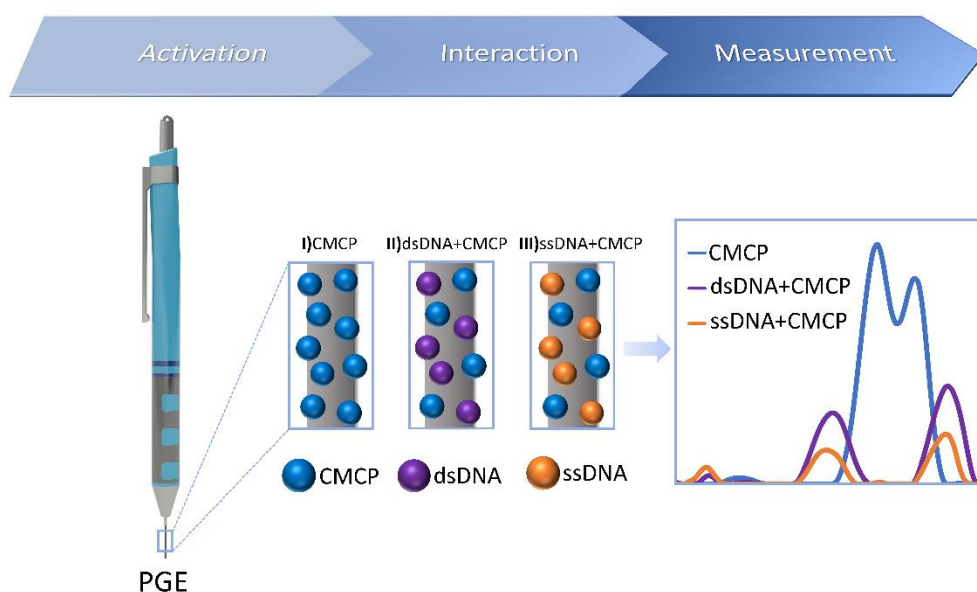
The PGEs, having undergone this electrochemical pre-treatment, were subsequently employed as the working electrodes in all ensuing experiments. Electrochemical surface pre-treatment serves to increase the surface area of electrodes, introduce functional groups on the electrode surface for stronger interactions with DNA molecules, and eliminate impurities from the electrode surface that might interfere with DNA analysis [21]. These attributes are pivotal in expediting electron transfer at the electrode interface [22], a fundamental factor contributing to the effectiveness of our experimental investigations.

### 2.3.3. Interaction

The electrochemical behaviour of CMCP was investigated through the application of DPV, considering scenarios with and without the presence of both ssDNA and dsDNA. The investigation began by examining the interaction of CMCP with ssDNA, employing a denaturation method as outlined in a previously referenced study [23]. To commence this particular phase of the experiment, we initiated a precise thermal treatment. Specifically, we subjected the sample to a brief heating step lasting 1 minute, with the temperature set at 95°C. Subsequently, we rapidly cooled the sample by placing it on ice. Subsequently, CMCP was introduced, and the ssDNA was immobilized onto the PGEs. Following this immobilization step, DPV measurements were conducted. In the subsequent phase, the interaction of CMCP with dsDNA was scrutinised. Solutions containing dsDNA and CMCP were gently agitated at 45°C and 600 rpm for a duration of 30 minutes. Following the interaction period, PGEs were immersed in these solutions, and DPV was employed for analysis.

### 2.3.4. Measurement

DPV and CV measurements were carried out across a voltage range spanning from +0.4 to +1.4 V, with a scan rate set at 50 mV/s. These tests were consistently executed under typical room temperature conditions (25°C). The visual representation of the experimental process was illustrated in **Figure 2**.



**Figure 2.** The experimental steps were as follows: activation of PGE with ACB, CMCP interaction with both dsDNA and ssDNA, and DPV measurements.

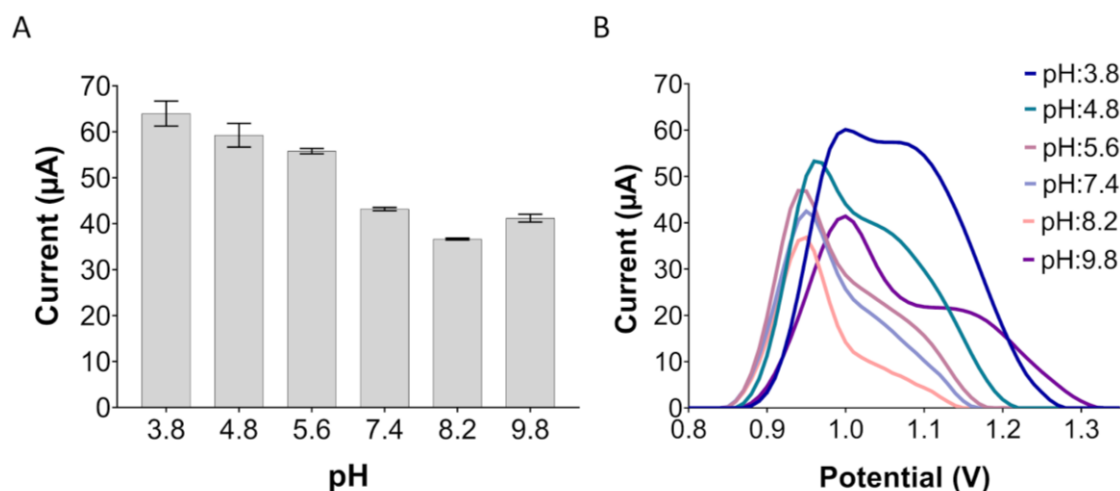
## 3. Results

### 3.1. Electrochemical Properties of CMCP

In this section, an investigation into the electrochemical behaviours of the drug candidate molecule was conducted using DPV. Initially, the impact of pH on the electrochemical oxidation signals of the drug candidate was assessed, and the results are illustrated in **Figure 3**. pH plays a pivotal role in drug metabolism and therapeutic efficacy, making it essential to identify the optimal pH conditions for the drug candidate. In the pH study, a range from 3.8 to 9.8 was examined using DPV. The objective was to identify the pH conditions that induce significant changes in peak current and peak potential.

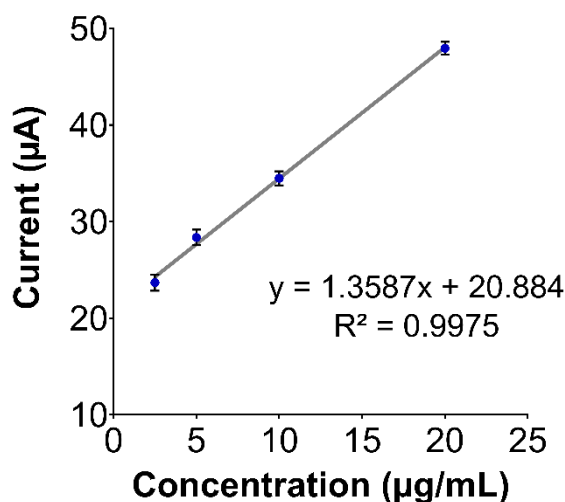
As it is seen from the Figure 3, the drug candidate has an oxidation signal at around +1V. The results revealed that CMCP consistently exhibited stable responses, with the most prominent peak observed at pH 3.8. Consequently, pH 3.8 was selected as the dilution buffer. This thorough exploration of pH conditions provides crucial insights into the electrochemical behaviour of the drug candidates and their potential therapeutic applications.





**Figure 3.** The effect of pH on peak currents and peak potentials. The bar graph showcases the behaviour of the CMCP across various pH values spanning from 3.8 to 9.8. Notably, the highest peak currents for CMCP were observed at pH 3.8.

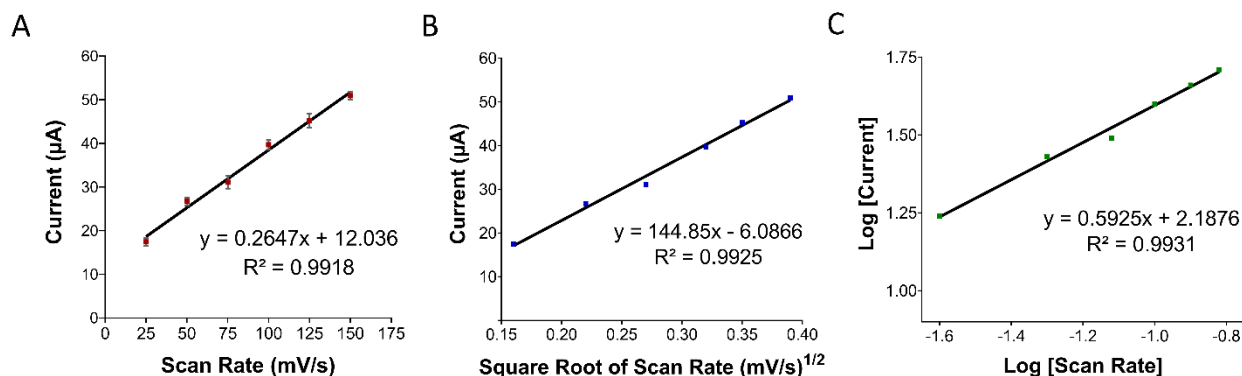
The subsequent phase of the study focused on establishing the analytical concentration ranges of the drug candidate through DPV measurements conducted at a scan rate of 50 mV/s. Calibration plots, depicted in **Figure 4**, were constructed across varying concentrations of CMCP. Notably, the resulting calibration graph exhibited a linear relationship between current response and concentrations. Specifically, the calibration plot for CMCP exhibited a correlation coefficient of 0.9975 (as depicted in Figure 4). The precise and reliable quantification of CMCP concentrations achieved using the developed methodology is clearly evident from these results.



**Figure 4.** Calibration graph of CMCP was obtained by plotting drug concentrations against the current peaks. DPV measurements were performed with different concentrations from 2.5 µg/mL to 20 µg/mL.

Calibration graph played a pivotal role in calculating the LOD and LOQ for the CMCP. Specifically, the concentrations 2.5, 5, 10 and 20 µg/mL were employed for the determination of LOD and LOQ for CMCP. The LOD and LOQ for CMCP were calculated to be 1.2 µg/mL and 4.1 µg/mL, respectively using the equation  $\text{LOD} = 3 s/m$ , and  $\text{LOQ} = 10 s/m$  ( $s$  is the standard deviation for the blank solution and  $m$  is the slope of the related calibration curve)[28].

By varying the scan rate, valuable insights can be gained into the kinetics and mechanism of electrochemical reactions. Adjusting the scan rate enables the exploration of different reaction pathways, assessment of the reversibility of redox processes, and analysis of the comprehensive electrochemical characteristics of compounds. Therefore, the study of scan rate provides a comprehensive understanding of the underlying processes and aids in the design and optimization of electrochemical detection methods and sensor devices. In the last part of the study the influence of scan rate (V) on peak current ( $I_p$ ) values was explored utilizing CV, covering a scan rate range from 25 mV/s to 150 mV/s.



**Figure 5.** Effect of scan rate on peak currents (A), peak current vs. the square root of the scan rate (B), effect of scan rate on the log of peak currents of CMCP (C).

The anodic peak currents ( $I_{p_a}$ ) exhibit a strong linear relationship with scan rates ( $\nu$ ) (**Figure 5A**). This correlation can be mathematically expressed by the following linear equation:

$$I_{p_a}(\mu A) = 0.02647\nu + 12.036 \quad (R^2 = 0.9918) \quad (1)$$

The relationship between  $I_{p_a}$  and the root of the scan rate ( $\nu^{1/2}$ ) also possesses a linear behaviour (**Figure 5B**) the linear equation is as follows:

$$I_{p_a}(\mu A) = 144.85\nu^{(1/2)} - 6.0866 \quad (R^2 = 0.9925) \quad (2)$$

Linear behaviour was also determined between  $\log(I_{p_a})$  and  $\log(\nu)$  within the scan rate range between 25 mV/s and 150 mV/s (**Figure 5C**):

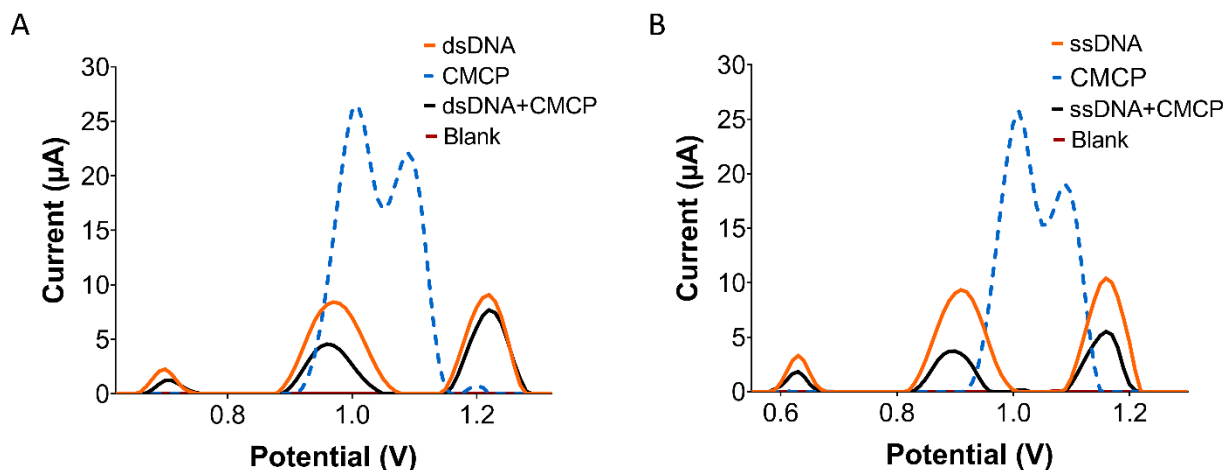
$$\log I_{p_a} = 0.5925\log \nu + 2.1876 \quad (R^2 = 0.9931) \quad (3)$$

Considering the insights from the literature, these obtained slope values closely align with theoretical expectations, particularly in the case of a value close to 0.5. This alignment suggests the prevalence of diffusion-controlled processes. In contrast, a theoretical value of 1 indicates processes influenced by adsorption [24,25]. For Equation 3, the determined slopes were calculated as 0.5925. This result distinctly implies that the electrochemical oxidation of CMCP diffusion-controlled processes.

### 3.2. Interaction

The electrochemical behaviours of CMCP were examined using DPV in the presence and absence of dsDNA. We begin by conducting a test to assess the interaction of CMCP with ssDNA. To facilitate this, a common method involving physical denaturation of dsDNA fragments was employed, as detailed in a referenced study [23]. In this process, a stock solution of dsDNA was initially prepared, and subsequently, 100  $\mu$ L of dsDNA was aliquoted and sealed in centrifuge tubes. Following this, all samples were subjected to a 1-minute heating step at 95°C in a thermal cycler, followed by cooling on ice for 10 minutes. After adding 10  $\mu$ g/mL of CMCP, the resulting ssDNA was immobilized onto pre-treated PGEs for 30 minutes through adsorption. After this immersion, DPV measurements were carried out.

In the second stage, the interaction of CMCP with ssDNA was examined. Solutions were prepared by mixing 50  $\mu$ g/mL of dsDNA and 10  $\mu$ g/mL of the CMCP in ACB. Following this, these solutions underwent thermal agitation at 45°C and 600 rpm using a thermal shaker for 30 minutes. Subsequently, 100  $\mu$ L of the resultant interaction solution was carefully transferred into tubes. Then, PGEs were submerged in the interaction solutions for a duration of 30 minutes. After this immersion, DPV measurements were carried out to evaluate the outcomes of the interaction.



**Figure 6.** Impact of CMCP Interaction on dsDNA and ssDNA. DPV results present guanine oxidation currents for dsDNA (A) and ssDNA (B) following interaction with CMCP.

In **Figure 6A**, the CMCP peaks were recorded as 26.45  $\mu\text{A}$  at 1.01 V and 22.10  $\mu\text{A}$  at 1.09 V. The two significant peaks of dsDNA in ACB (pH: 3.8) were measured at 8.32  $\mu\text{A}$  at +0.91 V and 9.13  $\mu\text{A}$  at 1.16 V. The addition of the CMCP drug decreased the two significant peak values of dsDNA to 5.41  $\mu\text{A}$  and 7.66  $\mu\text{A}$ , respectively. Following the interaction with CMCP, the peak potential of dsDNA shifted to +0.90 V, while the other peak potential remained unchanged. This shows that CMCP specifically affects the electrochemical properties of dsDNA.

In **Figure 6B**, the peaks of CMCP were measured at 25.73  $\mu\text{A}$  at 1.01 V and 19.03  $\mu\text{A}$  at 1.09 V. The two notable peaks for ssDNA were initially measured at 9.35  $\mu\text{A}$  at 0.91 V and 10.39  $\mu\text{A}$  at 1.16 V. Adding the CMCP drug significantly reduced the significant peak values for ssDNA to 4.27  $\mu\text{A}$  and 6.16  $\mu\text{A}$ , respectively. The presence of CMCP shows a distinct impact on the oxidation potentials of ssDNA. One peak potential for ssDNA shifted negatively from +0.91 V to +0.89 V, but the other peak potential remained unchanged. In this context, variations in peak potential-whether they are positive or negative-offer insights into the interaction mechanism between the drug candidate CMCP and DNA. Positive shifts in peak potential commonly signify intercalative binding, whereas negative shifts are indicative of electrostatic binding [26]. In the scope of our investigation, the observed negative shift in peak potential could be attributed to an irreversible electrode process. This phenomenon might be explained by electrostatic binding occurring between CMCP and DNA.

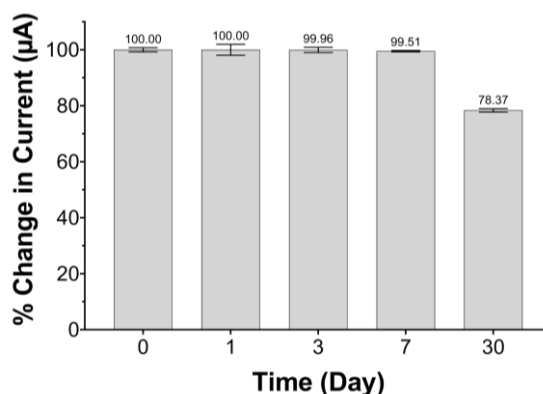
In order to investigate the toxicity effects of CMCP on dsDNA and ssDNA, guanine peak changes were calculated before and after interaction. Here is a simplified example of an equation that could be used to calculate the percentage change in peak current as an indicator of toxicity:

$$\text{Toxicity (\%)} = \frac{\text{Peak current (before interaction)} - \text{Peak Current (after interaction)}}{\text{Peak Current (before interaction)}} \times 100 \quad (4)$$

This equation yields a percentage value reflecting the extent of alteration in the electrochemical response attributable to the drug-DNA interaction. A greater percentage change may imply a more pronounced impact, potentially indicating heightened toxicity. In our investigation, this metric was determined as 53% for ssDNA and 41% for dsDNA. Broadly, an S% value exceeding 85 typically signifies non-toxicity, while a value within the range of 50 to 85 suggests a level of moderate toxicity. Conversely, a value below 50 is indicative of significant toxicity [27].

### 3.3. Stability

In our study, we investigated the stability of CMCP by subjecting freshly prepared solutions to controlled storage conditions within a light-protected environment at a constant temperature of 25°C. The tests were carried out over distinct time intervals, specifically on day 0, day 1, day 3, day 7, and day 30. Temporal changes in the peak currents of the drug were observed.



**Figure 7.** Change in current for CMCP examined at 25 °C for different days, e.g., 0, 1, 3, 7, and 30. The current value of the CMCP was about 78 % by the end of 30 days.

Here, CMCP exhibited good stability for 30 days of storage without significant percentage changes in current values, e.g. At the end of day 30, the percentage of the current value for CMCP was determined as 78%. The findings provide strong evidence that the stock solution of CMCP was stable for 30 days. This observation highlights the potential benefits of long-term use, as most of the drug candidates retained their essential pharmaceutical properties over an extended period.

#### 4. Discussion and Conclusion

In conclusion, our study investigated the electrochemical properties of triazolopyrimidinone derivative, CMCP and its interaction with ssDNA and dsDNA, employing DPV and CV. Our investigation centred on the newly identified drug candidate, CMCP characterized by its triazolopyrimidinone structure, and systematically probed its electrochemical behaviour. Through DPV experimentation, we systematically assessed the parameters including pH, concentration and scan rate. The ensuing determination of key parameters such as detection limits, reproducibility, precision, linearity, and LOD and LOQ further enriched our understanding. In the pursuit of stability, we conducted comprehensive assessments under optimal storage conditions, illuminating the durability of this compound on specific occasions. Employing DPV before and after interaction revealed substantial modifications in guanine bases upon the interaction of CMCP with dsDNA, thereby highlighting the pivotal role of our research findings. Our endeavour underscores the intricate interplay between electrochemistry, drug candidate, and DNA, underscoring the potential for innovative drug development and therapeutic advancement in the field of biomedicine.

#### References

- [1] Singh, P. K., Choudhary, S., Kashyap, A., Verma, H., Kapil, S., Kumar, M., Arora, M., Silakari, O. 2019. An exhaustive compilation on chemistry of triazolopyrimidine: A journey through decades. *Bioorganic Chemistry*, 88, 102919.
- [2] Tiwari, S., Talreja, S. 2022. A Study on Aromatic Heterocyclic Organic Compounds. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 34(41B), 36-40.
- [3] Arora, P., Arora, V., Lamba, H. S., Wadhwa, D. 2012. Importance of heterocyclic chemistry: a review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(9), 2947.
- [4] Yu, H., Xu, F. 2023. Advances in the synthesis of nitrogen-containing heterocyclic compounds by in situ benzyne cycloaddition. *RSC advances*, 13(12), 8238-8253.
- [5] Strzelecka, M., Świątek, P. 2021. 1, 2, 4-Triazoles as important antibacterial agents. *Pharmaceuticals*, 14(3), 224.
- [6] Low, Y. S., Garcia, M. D., Lonhienne, T., Fraser, J.A., Schenk, G., Guddat, L. W. 2021. Triazolopyrimidine herbicides are potent inhibitors of *Aspergillus fumigatus* acetohydroxyacid synthase and potential antifungal drug leads. *Scientific Reports*, 11(1), 21055.

- [7] Karthic, A., Kesarwani, V., Singh, R. K., Yadav, P. K., Chaturvedi, N., Chauhan, P., Yadav, B. S., Kushwaha, S. K. 2022. Computational analysis reveals monomethylated triazolopyrimidine as a novel inhibitor of SARS-CoV-2 RNA-dependent RNA polymerase (RdRp). *Molecules*, 27(3), 801.
- [8] Ribeiro, C. J., Kankanala, J., Xie, J., Williams, J., Aihara, H., Wang, Z. 2019. Triazolopyrimidine and triazolopyridine scaffolds as TDP2 inhibitors. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 29(2), 257-261.
- [9] Abu-Hashem, A. A., Hussein, H. A., Abu-zied, K. M. 2017. Synthesis of novel 1, 2, 4-triazolopyrimidines and their evaluation as antimicrobial agents. *Medicinal Chemistry Research*, 26, 120-130.
- [10] Pismataro, M. C., Felicetti, T., Bertagnin, C., Nizi, M.G., Bonomini, A., Barreca, M. L., Cecchetti, V., Jochmans, D., De Jonghe, S., Neyts, J., Loregian, A. 2021. 1, 2, 4-Triazolo [1, 5-a] pyrimidines: Efficient one-step synthesis and functionalization as influenza polymerase PA-PB1 interaction disruptors. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 221, 113494.
- [11] Zhang, B., Yao, Y., Cornec, A. S., Oukoloff, K., James, M. J., Koivula, P., Trojanowski, J. Q., Smith, A. B., Lee, V. M. Y., Ballatore, C., Brunden, K. R. 2018. A brain-penetrant triazolopyrimidine enhances microtubule-stability, reduces axonal dysfunction and decreases tau pathology in a mouse tauopathy model. *Molecular neurodegeneration*, 13, 1-15.
- [12] Dai, X. J., Xue, L. P., Ji, S. K., Zhou, Y., Gao, Y., Zheng, Y. C., Liu, H. M., Liu, H. M. 2023. Triazole-fused pyrimidines in target-based anticancer drug discovery. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 249, 115101.
- [13] Patil, S. D., Rhodes, D. G., Burgess, D. J. 2005. DNA-based therapeutics and DNA delivery systems: a comprehensive review. *The AAPS journal*, 7, E61-E77.
- [14] Baguley, B. C., Drummond, C. J., Chen, Y. Y., Finlay, G.J. 2021. DNA-binding anticancer drugs: One target, two actions. *Molecules*, 26(3), 552.
- [15] Sabir, A., Majeed, M. I., Nawaz, H., Rashid, N., Javed, M. R., Iqbal, M. A., Shahid, Z., Ashfaq, R., Sadaf, N., Fatima, R., Sehar, A. 2023. Surface-enhanced Raman spectroscopy for studying the interaction of N-propyl substituted imidazole compound with salmon sperm DNA. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 41, 103262.
- [16] Sharifi-Rad, A., Amiri-Tehranizadeh, Z., Talebi, A., Nosrati, N., Medalian, M., Pejhan, M., Hamzkanloo, N., Saberi, M. R., Mokaberi, P., Chamani, J. 2023. Multi spectroscopic and molecular simulation studies of propyl acridone binding to calf thymus DNA in the presence of electromagnetic force. *BioImpacts: BI*, 13(1), 5.
- [17] Agarwal, S., Jangir, D.K., Mehrotra, R. 2013. Spectroscopic studies of the effects of anticancer drug mitoxantrone interaction with calf-thymus DNA. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 120, 177-182.
- [18] Liu, Z. J., Si, Y. K., Chen, X.G. 2010. Application of circular dichroism to the study of interactions between small molecular compounds and DNA. *Yao xue xue bao= Acta Pharmaceutica Sinica*, 45(12), 1478-1484.
- [19] Mollarasouli, F., Dogan-Topal, B., Caglayan, M. G., Taskin-Tok, T., Ozkan, S. A. 2020. Electrochemical, spectroscopic, and molecular docking studies of the interaction between the anti-retroviral drug indinavir and dsDNA. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 10(5), 473-481.
- [20] Rauf, S., Gooding, J. J., Akhtar, K., Ghauri, M. A., Rahman, M., Anwar, M. A., Khalid, A.M. 2005. Electrochemical approach of anticancer drugs–DNA interaction. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 37(2), 205-217.
- [21] Srinivas, S., Senthil Kumar, A. 2023. Surface-Activated Pencil Graphite Electrode for Dopamine Sensor Applications: A Critical Review. *Biosensors*, 13(3), 353.
- [22] Jakóbczyk, P., Dettlaff, A., Skowierzak, G., Ossowski, T., Ryl, J., Bogdanowicz, R. 2022. Enhanced stability of electrochemical performance of few-layer black phosphorus electrodes by noncovalent adsorption of 1, 4-diamine-9, 10-anthraquinone. *Electrochimica Acta*, 416, 140290.
- [23] Wang, X., Lim, H.J., Son, A. 2014. Characterization of denaturation and renaturation of DNA for DNA hybridization. *Environmental health and toxicology*, 29.
- [24] Buleandra, M., Popa, D. E., David, I. G., Bacalum, E., David, V., Ciucu, A. A. 2019. Electrochemical behavior study of some selected phenylurea herbicides at activated pencil graphite electrode. *Electrooxidation of linuron and monolinuron. Microchemical Journal*, 147,1109-1116.
- [25] Wang, L., Vullum, P. E., Asheim, K., Wang, X., Svensson, A. M., Vullum-Bruer, F. 2018. High capacity Mg batteries based on surface-controlled electrochemical reactions. *Nano Energy*, 48, 227-237.

- [26] Sirajuddin, M., Ali, S., Badshah, A. 2013. Drug–DNA interactions and their study by UV–Visible, fluorescence spectroscopies and cyclic voltametry. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 124,1-19.
- [27] Topkaya, S. N., Kaya, H. O., Cetin, A.E. 2021. Electrochemical Detection of Linagliptin and its Interaction with DNA. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 18(5), 645.
- [28] N. miller Jcm. 2005. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*: 5th pearson education, Essex, London, 121 p.

## Tarihi Miralay Şerif Bey Konağının Malzeme Özelliklerine Bağlı Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması

Müslüm KILINÇ<sup>\*1</sup>, Erdal VURAL<sup>2</sup>, Nurullah TOPKARAOĞLU<sup>3</sup>

<sup>\*1</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ  
<sup>2</sup> Amasya Üniversitesi Merzifon Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, AMASYA  
<sup>3</sup> Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 27.11.2022, Kabul / Accepted: 19.10.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Tarihi yapılar,  
Sonlu elemanlar yöntemi,  
Sayısal modelleme,  
Dinamik analiz

**Öz:** Tarihi ve kültürel miras açısından toplumlar için önemli olan yapıların gelecek kuşaklara kullanılabilir bir şekilde aktarılması amacıyla günümüz teknolojisinde kullanılan gelişmiş sensörler ile yapıya zarar vermeden frekans ve mod gibi yapının dinamik davranışları belirlenebilmektedir. Bu veriler yardımı ile yapının geometrisi ve malzeme özellikleri birleştirilerek doğru sayısal modeller oluşturulup yapılarda hasar tespiti yapılabilmektedir ve sonrasında ise gerekli tedbirler alınarak yapının servis ömrü uzatılabilmektedir. Bu çalışmada, Yozgat'ta 1890'larda inşa edilen Miralay Şerif Bey konağının sonlu elemanlar metodu yardımı ile sayısal modellenmesi yapılarak yapının dinamik analizi yapılmıştır. Çalışmada yerinde yapılan ölçümler sonucunda yapının boyutlar geometrisi ve malzeme özellikleri belirlenerek yapının sayısal modeli oluşturulmuştur. Yapıya ait malzeme özellikleri her kat için diğer katlardan bağımsız bir şekilde izotropik ve anizotropik malzeme olarak belirlenmiştir. Tanımlanan modellerin dinamik analizinin tamamlanmasının ardından yapı dinamik parametrelerinden mod şekilleri ve frekans değerleri hesaplanarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak farklı malzeme özellikleri ile oluşturulan modellerden elde edilen yapıların dinamik parametrelerinin belirgin şekilde değiştiği tespit edilmiştir.

## Comparison of Dynamic Behaviors of Historical Miralay Şerif Bey Mansion Based on Material Properties

### Keywords

Historical structures,  
Finite element method,  
Numerical modeling,  
Dynamic analysis

**Abstract:** For the purpose of passing on the structures that are important for societies in terms of historical and cultural heritage to future generations in a healthy condition, dynamic behaviors of structures such as frequency and mode can be determined with advanced sensors used in today's technology without damaging the structure. By combining these data with geometry and material properties of structures and creating accurate numerical models, structural damages can be determined, and then service life of structures can be extended by taking necessary precautions. In this study, dynamic analysis of the Miralay Şerif Bey mansion, which was built in Yozgat in 1890s, was made by numerical modeling with finite element method. First, geometry of the structure along with its dimensions was determined and a numerical model was created with a realistic estimation of material properties. Material estimates were made for each floor as isotropic and anisotropic materials regardless of the other floors. After completing dynamic analysis of defined models, mode shapes and frequency values were calculated from the dynamic parameters of the structure and necessary comparisons were made. Consequently, It is determined that the dynamic parameters of the structure obtained from the numerical models created with different material properties change significantly.

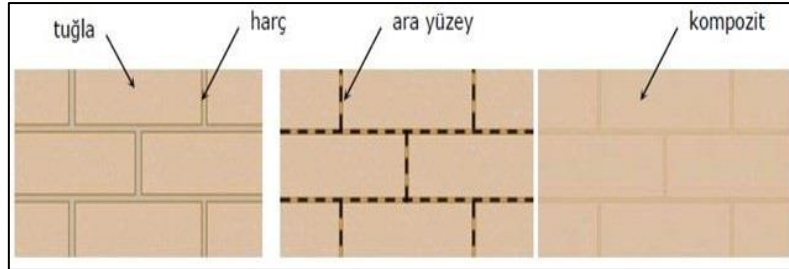
\*Corresponding Author, e-mail: kilinc@erciyes.edu.tr

## 1. Giriş

Tarihi yapılar, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılmasını sağlayan ve tüm insanlığın ortak değeri olarak nitelendirilen yapılardır. Bu mirasın geleceğe güvenle aktarılması amaçlanmalıdır. Bunun için tarihi yapıların tarihi ve işlevsel özelliklerine bağlı olarak korunması, bakımı, onarımı ve güçlendirilmesi gereklidir. Özellikle yapıya zarar vermeden bu işlemlerin yapılması çok önemlidir ve gelişen teknoloji ile birlikte yapıya zarar vermeden analiz yapmak mümkündür [1].

Tarihi yapıların güvenli bir şekilde uzun yıllar boyunca ayakta kalabilmesi için bu yapıların özellikle deprem ve rüzgar gibi dinamik yükler etkisi altındaki davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarının bilinmesi ancak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi ile mümkündür. Bu dinamik parametreler yapının periyodu ve doğal frekansı, mod şekilleri ile sönüm oranıdır. Bu parametrelerin belirlenmesi yapının sayısal olarak modelinin oluşturulması ve ardından yapılacak dinamik analiz ile mümkündür. Yapının dinamik davranışını belirleyen bu parametreler yapıların tasarımında önemli yer tutan dinamik yüklerin hesaplanmasında ve önceden oluşturulmuş sayısal modelin güncellenerek daha uygun bir yapı modeli oluşturulması amacıyla kullanılmaktadır. Bu dinamik parametreler yapının yapıldığı malzemenin özelliklerine, yapısal özelliklere, hasar durumuna ve sınır şartlarına bağlıdır. Yapı modeli oluşturulurken yapının geometrisi ölçümlerle belirlenmektedir fakat yapı malzemesinin özellikleri zamanla değişmektedir [1].

Tarihi yığma yapıların modellenmesinde en önemli husus yapıda taşıyıcı olarak görev yapan yığma duvarların modellenmesidir. Yığma yapıların sayısal olarak tasarımı malzemenin ve modelleme yöntemlerinin farklılığı sebebiyle geleneksel betonarme veya çelik taşıyıcı sisteme sahip bir yapının modellenmesine göre farklıdır. Yığma yapıların sayısal olarak modellenebilmesi için detaylı ve basitleştirilmiş mikro modelleme ile makro modelleme gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Detaylı mikro modellemede yapının taşıyıcı elemanı olan duvarın yapıldığı malzemenin mekanik özellikleri ayrı ayrı tanımlanır. Bu modelleme de çatlakların malzeme ile harcın arasındaki yüzeyde oluşacağı varsayılır. Basitleştirilmiş mikro modellemede birbirine komşu iki malzeme ile harç arasında kütle yoğunlaştırılması yapıldığı ve çatlakların yaklaşık olarak ara yüzeyde oluşacağı kabul edilerek harcın Poisson oranı yok sayılır. Makro modellemede ise malzeme ile harç beraber ve kompozit bir şekilde çalıştığı varsayılır. Bu yöntem genel olarak büyük yapılarda kullanılır. Yığma yapıların modelleme teknikleri Şekil 1'de gösterildiği gibidir [1].



Şekil 1. Yığma Yapı Modelleme Yöntemleri

Ayrıca tarihi yığma yapıların modellenmesi hem yapıyı oluşturan elemanların geometrik ölçülerindeki hem de yapıda kullanılan malzemelerdeki farklılıklar sebebiyle geleneksel taşıyıcı sisteme sahip yapılara göre daha karmaşıktır. Bu nedenle bu yapıların modellenmesinde yapıyı çok sayıda küçük parçalara bölerek çözümleme fikrine dayanan sayısal bir çözüm yöntemi olan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde elle çözülmesi çok karmaşık ve zor olan mühendislik problemleri SEM ile çözüme kavuşturulmaya başlanmıştır. Bu yöntemde ilk önce sayısal çözümü yapılacak olan yapı küçük parçalara bölünerek elemanlara ve düğüm noktalarına ayrılır. Sonra her bir elemanın fiziksel davranışları ayrı ayrı tanımlanır. Tüm yapının yaklaşık denklem sistemini oluşturabilmek için düğümlerdeki elemanlar şekil fonksiyonları yardımı ile birleştirilir. Düğümlerde bilinmeyenleri içeren denklem sistemleri çözülür ve seçilen elemanlardaki bilinmeyen değerler hesaplanır [2].

Tarihi yapılarda bir diğer önemli husus ise bu yapıların bakımı, onarımı ve güçlendirilmesi sırasında yapıya bir zarar verilmemesidir. Gelişen teknoloji ile yapıya zarar vermeden yapının mevcut durumu ve durumunda yaşanan değişiklikler Yapısal Sağlık İzleme (YSİ) ile anlık takip edilebilir. Yapısal sağlık izleme genellikle köprü ve gökdelen gibi daha fazla dinamik yüke maruz kalan yapılarda uygulansa da bu izleme işlemi tarihi yapılarda da uygulanarak yapıların dinamik davranışı belirlenebilir. Ayrıca gerektiği takdirde yapı tekrardan modellenebilir veya mevcut model güncellenebilir. Yapısal sağlık izleme ile dinamik parametrelerin belirlenmesi sismik titreşim ivmeölçerler ile mümkündür. İvme değerleri sismik ivmeölçerler ile belirlenir ve elde edilen verilerin analizi yapılarak yapının dinamik parametrelerin tahmini yapılır. Bu parametreler ışığında da yapının dinamik davranışı belirlenmiş olur.



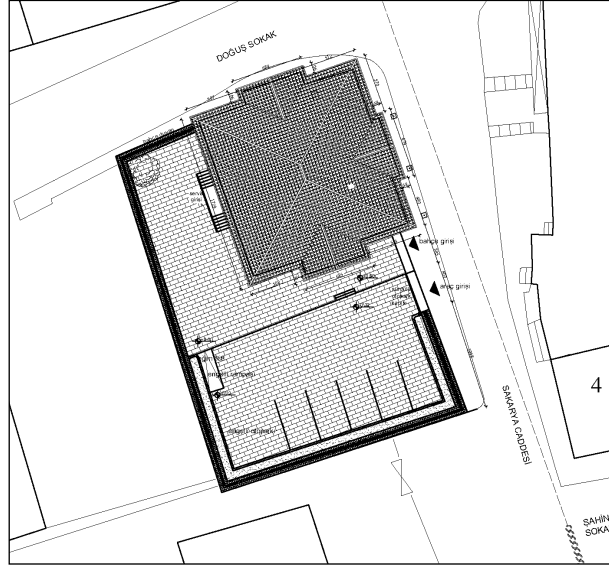
Bu yöntem yapıya ek olarak titreşim kuvveti verilmediği gibi herhangi bir yıkıma ve kalıcı hasara neden olmadığı için ayrıca çok pahalı ve kullanılması karmaşık cihazlara gerek duyulmamasından dolayı günümüzde tercih edilen bir yöntemdir. Yapı sadece çevresel (ortamsal) titreşimden (yapı çevresindeki yaya ve trafik hareketi, rüzgar ve deprem gibi yatay yükler gibi) etkilenmekte ve yapının bu titreşimlere verdiği tepkiler ölçülebilmektedir. Yapının verdiği bu tepkilere göre yapı dinamik parametreleri belirlenebilir.

Tarihi yapıların modellenmesi ve dinamik parametrelerinin belirlenmesi ile ilgili ülkemizde ve dünyada çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Tarihi Lala Paşa Camii'nin statik ve dinamik davranışı sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Bu inceleme esnasında deprem yönetmeliği, malzeme özellikleri ve bilgisayar programlarından faydalanmışlardır. Statik analizde tarihi yapının kendi ağırlığı ile beraber şehrin iklimsel özelliklerinden dolayı kar yükünü kullanmışlardır. Dinamik analizde ise bölgeye yakın bir konumda 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin ivme değerlerinden faydalanmışlardır. Yapının programda sayısal modelinin tamamlanmasından sonra yapılan statik analiz sonucunda yapıda en fazla zorlanan bölgenin pencere ve kapı kenarları olduğu belirlenmiştir. Dinamik analiz sonucunda yapının frekans ve mod şekillerinin bulunması ile yapıda ana kubbenin daha fazla zorlandığı sonucuna varılmıştır [3]. Tarihi Roma amfi tiyatrosu ve Canegliano katedralinde yapıların davranışlarını yüksek güvenle belirlemek amacıyla yapılar yaklaşık bir yıl boyunca izlenmiştir. Amfi tiyatro da ivmeölçerler aracılığıyla titreşim verilerini ve incelenen çatlakların yer değiştirmesini tespit etmek için bir yapısal sağlık izleme sistemi kurulmuştur. Katedrale ise farklı bir sistem olan optik izleme sistemi ile çatlakların genişliğini değerlendirilmiştir. Yapıları en iyi şekilde değerlendirmek, korumak ve belirsizlikleri azaltmak için istatistiksel modeller ve hasar tespit algoritmaları geliştirilerek uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda yapıda hasarın yol açtığı değişiklikler tahmini olarak hesaplanmıştır [4]. İki farklı yapı malzemesi kullanılarak inşa edilmiş kubbelerle sahip iki tarihi caminin dinamik parametreleri sismik ivmeölçerlerle hesap edilmiştir. Bu çalışmada camilerden biri yığma yapı olup kubbesi yığma tuğla ile yapılmıştır. Diğer cami ise betonarme bir kubbeye sahiptir. Her iki yapıda çevresel titreşime tabi tutulmuş ve yapıların doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve sönüm oranları bulunmuştur. Çalışmanın sonucunda betonarme kubbeye sahip caminin diğer camiye göre daha yüksek frekans değerlerine sahip olduğu hesaplanmıştır [5]. 2009 yılında İtalya'da meydana gelen depremden etkilenen tarihi bir kilisenin zarar seviyesini tespit etmek ve yapının depreme karşı gösterdiği tepkinin test edilmesi amaçlanmıştır. Yapı yaklaşık olarak iki yıl boyunca statik ve dinamik açıdan incelenmiştir. Depremden kaynaklanan yer hareketi ve ortamsal titreşimler ivmeölçer vasıtasıyla izlenmiştir. Frekans bölge ayrıştırması yöntemini kullanarak yapının dinamik parametrelerinin ve deformasyonlarının yapıda herhangi bir titreşim etkisi oluşturan bir kuvvet vermeden hesaplanmıştır [6]. Tarihi Şinik taş kemer köprüsünün hem 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak hem de çevresel titreşimden yararlanılarak Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yapının doğal frekansı, sönüm oranı ve mod şekilleri gibi dinamik davranışı belirleyen parametrelerin hesaplanması amaçlanmıştır. Deneysel ölçümler esnasında üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Sonuç olarak teorik ve deneysel modal analiz sonucunda ilk mod şekillerinin birbirini desteklediği ve ilk modun enine doğrultuda ötelenme olduğu belirlenmiştir. Fakat teorik ve deneysel modal analiz sonucunda yapıda oluşan frekansların birbirleriyle uyumlu olmadığı görülmüştür [7]. Bir başka çalışmada tarihi Tağar köprüsü sonlu elemanlar yöntemi ile modellendikten sonra doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizler yapılmıştır. Sismik etki oluşturmak amacıyla 1992 yılında gerçekleşen Erzincan depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Yapıda gözlenen ilk çatlaklar, köprü kemerinin ve kemerin yan duvarının temel ile birleşen kısımlarında meydana gelmiştir. Köprü'nün titreşim hareketi nedeniyle sonradan yeni çatlak bölgeleri oluşmuş ve bu çatlaklar köprü içerisinde büyüyerek devam etmiştir [8]. Taş kemer köprülerin deprem anındaki dinamik davranışını belirlemek amacıyla Erzurum Kireçli köprüsü incelenmiştir. Köprü üzerine yerleştirilen ivmeölçer ile çevresel titreşimler kullanılarak yapının frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapılan modal analizi sonucunda yapının doğal frekansları ve mod şekilleri hesaplanarak deneysel yöntem ile karşılaştırılmıştır. Model iyileştirilmesi yapılarak sonlu elemanlar modeli üzerinde 1992 Erzincan depremi kaydı kullanılarak analizler yapılmıştır [9]. Tarihi taş kemer köprülerin doğal frekanslarını belirlemek için deneysel bir bağıntı geliştirmek amacıyla geometrisi farklı tarihi niteliğe sahip 30 adet taş kemer köprü belirlenmiştir. Seçilen köprüler önce sonlu eleman yöntemi ile modellenmiş ve modal analiz yapılarak doğal titreşim frekansları ile mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra bu köprülerin geometrik boyutlarıyla doğal frekansları arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla boyutlara bağlı frekans hesabı için deneysel bir bağıntı ortaya konulmuştur. Elde edilen deneysel bağıntının tek açıklıklı kemer köprülerin frekans değerlerinin tahmininde gerçek ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [10]. Dongjiang Kemer Barajı'nın dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla barajın etrafına çeşitli patlayıcı maddeler yerleştirilerek yapı titreştirilerek barajın bu titreşimlere verdiği tepkiler belirlenmiştir. Çalışmada deneysel analizler ile yapının sonlu elemanlar metodu kullanılarak hazırlanan modeli üzerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma ile deneysel analiz ve sonlu eleman modeli üzerinden yapılan analiz sonuçlarının birbirine uyumlu olduğu tespit edilmiştir [11]. Tarihi yapıların deprem etkisi altındaki davranışının modelleme yaklaşımlarına göre belirlenmesi amacıyla Bursa Ulu Camii makro modelleme tekniği kullanılarak dört farklı şekilde modellenmiştir. Modeller sonlu elemanlar yöntemine göre oluşturulmuş ve dinamik analiz ise zaman tanım alanı yöntemi kullanılarak yapılmıştır. 1. modelde minarenin tüm elemanları eksiksiz dikkate alınmıştır. 2. modelde merdiven, 3. modelde hem merdiven hem de kapı pencere boşluğu yoktur.

4. modelde ise merdivenli, kapı pencere boşluksuz, şerefesiz ve düz külahlı olarak modellenmiştir. İvmeölçerler kullanılarak yapıdan alınan titreşim kayıtları ile yapının dinamik özellikleri belirlenmiş ardından sayısal ve deneysel modeller karşılaştırılarak model iyileştirme yapılmıştır. Daha sonra yapıda hem modal analiz hem de 1999 Kocaeli Depreminde alınmış ivme değerlerine göre deprem analizi yapılmıştır. Sonuç olarak mod şekilleri incelendiğinde, bütün modellerin benzer modal davranış gösterdikleri görülmektedir. Sadece doğal titreşim periyotları dikkate alındığında merdivenli sistemde merdivensiz sisteme göre daha yüksek doğal titreşim periyodu olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebinin yapının kütlede meydana gelen artıştan kaynaklı olabileceği düşünülmüştür [12]. 17. yüzyılda inşa edilmiş La Iglesia de la Compañía de Jesus kilisesinde yapılan güçlendirmenin uygunluğunun doğrulanması amacıyla yapıyı sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek seçilen bölgelerden titreşim verileri alınmıştır. Ortam titreşimleri Hybrid Bridge Evaluation System kurularak kaydedilmiş ve veriler dönüştürücü ile toplanıp bilgisayara aktararak işlendikten sonra frekans-domain ve time-domain metodlarını içeren bir yazılım ile işlenen verilerden yapının doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. 1998 yılında yapılan onarım çalışmasından sonra elde edilen frekanslar, 1999 yılında yapılan güçlendirme çalışmasından sonra elde edilen frekanslar, SAP2000 programında analitik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen yapının analizi sonucu elde edilen frekanslar ve 2001 yılında yapılan titreşim testi sonucu ivmeölçerler ile alınan kayıtların işlenmesinin ardından yazılım ile belirlenen frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda yapının onarımdan sonra yapılan güçlendirme ile yapının rijitliğine bağlı olarak frekanslarının arttığı gözlemlenmiştir [13]. Tarihi St. Sergius -Bacchus kilisenin mevcut durumu ve dayanıklılığının tespiti amacıyla çoğunlukla tuğla taş ve harçtan inşa edilen yapının malzeme testleri yapılmış, yapının geometrisinin ölçülerek planlarının hazırlanmasının ardından hasarlı bölgeler tespit edilerek yapı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek analizi yapılmıştır. Yapı üzerinde tespit edilen çatlaklar ile hesaplamalar sonucu tahmin edilen çatlaklar karşılaştırılarak eşleştirilmiştir. Ayrıca yapıyı tanımlamak için serbest titreşim ölçümleri yapının galeri katı seviyesinde ve kubbe halkasında yapılmıştır. Titreşimler sonucu elde edilen verilere göre beş adet frekans değeri ve mod şekli hesaplanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre yapının restorasyonuna ve güçlendirilmesine başlanmıştır [14]. 1748-1755 yılları arasında inşa edilen tarihi Nur-u Osmaniye Camii'nin deprem yükleri altındaki davranışını ve dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla yapı içerisine titreşim kayıtlarını elde edebilmek için gerekli cihazlar yerleştirilerek titreşim verileri kaydedilerek veri analizi yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen hâkim frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan hasarsız test tekniklerinden olan Operasyonel Modal Analiz tekniği ile 2 adet sayısallaştırıcı ve 7 adet 3-Eksenli ivmeölçer kullanılarak yapıdan serbest titreşim kayıtları alınmıştır. İvme kayıtları kullanılarak hesaplanan Fourier ve güç spektrumu analizleriyle ana eksenler doğrultusunda 6 adet mod ve serbest titreşim frekansları elde edilmiştir. Elde edilen dinamik verilere göre ilk iki frekansın her iki doğrultudaki ötelenme şeklinde ve üçüncü frekansın burulma şeklinde ortaya çıkması nedeniyle yapı taşıyıcı sisteminin ve dinamik davranışının oldukça iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapının kible doğrultusundaki davranışın, kibleye dik doğrultudaki davranışına göre daha rijit olduğu sonucuna varılmıştır [15]. Tarihi yapıları korumak ve bu yapılarda hatalı uygulamaları azaltmak amacıyla yapılan çalışmada malzeme özelliklerinin en uygun şekilde belirlenmesi ve uygulamalar ile ilgili birtakım öneriler verilmiştir. Bu sebeple incelenen yapıdan laboratuvarında gerçekleştirilecek testler için ahşap, harç ve sıva malzemesi olmak üzere toplam 8 adet numune alınarak kimyasal ve mineralojik analiz testleri yapılmıştır. Teste yapılan harç ile sıva numunelerinde karbonat, sülfat, ve fosfat tuzlarına rastlanılmamıştır. Fakat klorürün var olduğu belirlenmiştir. Tüm numunelerde proteinin bulunması, harcın bağlayıcılığını arttırmak için organik bir malzeme kullanıldığını göstermektedir. Yapının dış cephe yüzeylerinde mineral sıvanın kaldırılması ve onun yerine sıva uygulanması ayrıca ahşap malzemenin dayanıklılığını yitirdiği kısımlarda ise kullanılan malzemenin aynı türden malzeme ile değiştirilmesi önerilmiştir [16]. Tarihi yapılarda oluşan hasarların tespitinin yapılması bu yapıların korunumu için önem arz ettiğinden hasarsız test yöntemleri kullanılarak Sevilla'da bulunan Tabernacle Şapeli sonlu elemanlar metodu ile değerlendirilmiştir. Çalışmada Dijital görüntü işleme, infrared termografisi, lazer seviyelendirme, ortam titreşim testleri ve yer radarı gibi yeni teknolojik yöntemler kullanılmıştır [17]. Porto Torres'teki (Sardinya, İtalya) en önemli Roma Hamamı olan "Re Barbaro" Sarayı'nın yerinde testleri ve yapısal analizlerinin yapıldığı çalışmada lazer tarayıcı, yüzey radar testleri, ses testleri, kızılötesi termografi testleri ve fiberskop incelemeleri gerçekleştirilerek toplanan veriler, sonlu elemanlar yapısal modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır [18].

Bu çalışmada Yozgat ilinin Merkez ilçesinde Aşağı Nohutlu mahallesinde imarda 9 pafta 261 ada 4 parselde bulunan Miralay Şerif Bey Konağı dinamik açıdan incelenmiştir. Miralay Şerif Bey Konağı dönemin kaynakları ve Başbakanlık Osmanlı arşivlerine göre 1890 yılında dönemin alay komutanı Miralay Şerif Bey tarafından inşa ettirilmiştir. Daha sonra 1924 yılı içerisinde Türkiye Cumhuriyeti kurucusu Gazi Mareşal Mustafa Kemal Atatürk ve eşi Latife Hanım Anadolu'daki resmi gezilerine çıktıklarında Miralay Şerif Bey Konağı'nda da istirahat etmişlerdir. Önceleri Ankara İl Özel İdaresinin kontrolünde bulunan konağın kullanma hakkı Yozgat İl Özel İdaresine devredilmiştir. Başlarda muallim mektebi olarak kullanılan konak, ardından hastane olarak hizmet vermiş olup, yapının zemin katı izcilik kurulu, üst katlar ise anaokulu olarak da kullanıldıktan sonra artık günümüzde yapı Kalkınma Bakanlığına bağlı olan Orta Anadolu Kalkınma Ajansının Yozgat ilindeki ofisi olarak varlığını sürdürmektedir.

Yapının elemanlarından üst salon ve çatı katındaki döşeme ile tavanlar önceleri ahşap iken 1959 yılında sökülerek betonarme bir yapıya dönüştürülmüştür. Zemin ve 1. kat döşemeleri ise 1989 yılında yapılan tadilat çalışmaları ile betonarmeye çevrilmiştir. Bu tadilatlar sonucunda yapının iç kısmında o dönemin özellikleri tamamen yok olmuştur. Fakat dış cephede hiçbir değişiklik yapılmamıştır. 2014 yılında Kalkınma Bakanlığına bağlı Orta Anadolu Kalkınma Ajansı tarafından yapıyı eski haline getirmek, döşeme ve tavanları tekrardan ahşap olarak inşa etmek amacıyla başlatılan tadilat 2017 yılında sona ermiştir. İç Anadolu'nun diğer geleneksel tarihi konaklarında da olduğu gibi bu tarihi yapıda dışarıdan iç kısımlara doğru sokak, bahçe, sofa ve oda sıralamasına göre inşa edilmiştir. Yapının güneyi ile batısı bahçeye, kuzeyi ve doğusu yola bakmaktadır. Konak biri zemin kat olmak üzere toplamda üç kattan oluşmaktadır. Güneyinde ve batısında iki giriş kapısı vardır. Konağın ana yapı malzemesi taştır ve tamamen yığma taş tekniği kullanılarak inşa edilmiştir. Yapının cephelerinde moloz taş, kesme taş ile harman tuğlası kullanılmış ve kat seviyeleri taş silmelerle belirlenmiştir [19]. Şekil 2 ve Şekil 3'de Miralay Şerif Bey konağının vaziyet planı ile restorasyon öncesi, sırası ve sonrası görünüşleri verilmektedir.



Şekil 2. Miralay Şerif Bey Konağı Vaziyet Planı



Şekil 3. Miralay Şerif Bey Konağı Restorasyon Öncesi, Sırası ve Sonrası Görünüşleri

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmaya konu olan Miralay Şerif Bey konağının sayısal modellemesi ve analizi SEM kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda yapının modellenmesi ve analizi solid elemanlar kullanılarak yapılmıştır [2]. Tarihi yapıların yüzyıllar önce inşa edilmiş olması ve bundan kaynaklı özellikle bu yapılarda kullanılan malzemelerde ve yapı geometrisinde yaşanan belirsizliklerden dolayı bu çalışmada Miralay Şerif Bey konağının farklı malzemeler kullanılarak ve farklı şartlar altında 4 farklı durum için sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde mekanik özellikleri ve davranışları doğrultuya ve yöne göre değişmeyen izotropik malzemelerden beton ve çelik yapı malzemelerinin kullanımı ile mekanik özellikleri ve davranışları doğru ve yöne göre farklılık gösteren anizotropik

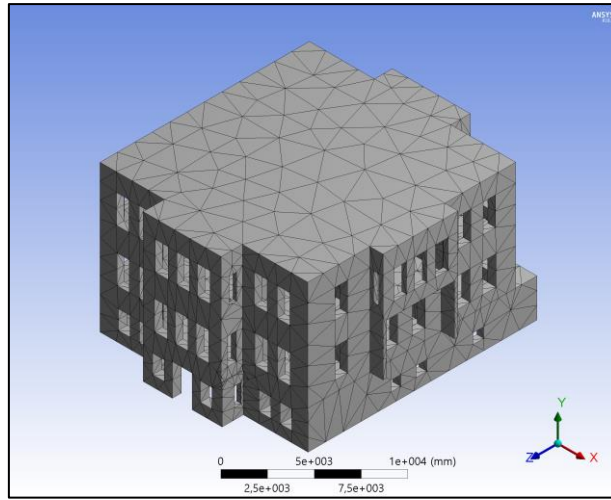
malzemelerden ahşap yapı malzemesinin kullanımı tercih edilmiştir. Bilgisayar programı ile modellenen dört farklı yapı modelinde dikkate alınan parametreler aşağıda verilmektedir.

- Tek Tip Yapı Malzemesi Kullanılarak Oluşturulan Yapı Modelleri
- Farklı Tip Yapı Malzemeleri Kullanılarak Oluşturulan Yapı Modelleri
- Yapının Katlarında Farklı Beton Sınıfları Kullanılarak Oluşturulan Yapı Modelleri
- Yapının Duvar ve Döşemelerinde Farklı Beton Sınıfları Kullanılarak Oluşturulan Yapı Modelleri

Yukarıda bahsedilen 4 modelde de kullanılan ortak parametreler Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan ortak parametreler		
Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı	Minimum Eleman Boyutu (mm)
26112	13474	10,00

Şekil 4’de temeli sonlu elemanlar metoduna dayanan bilgisayar programında modellenen Miralay Şerif Bey konağına ait yapının sonlu elemanlar modeli verilmiştir.



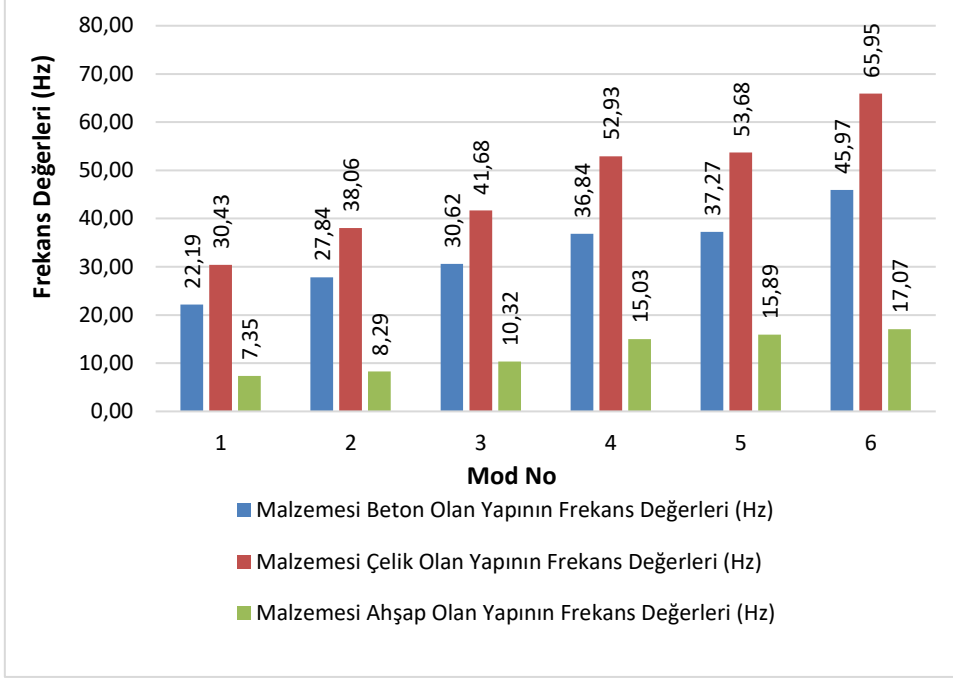
Şekil 4. Miralay Şerif Bey Konağı Sonlu Elemanlar Modeli

### 3. Bulgular

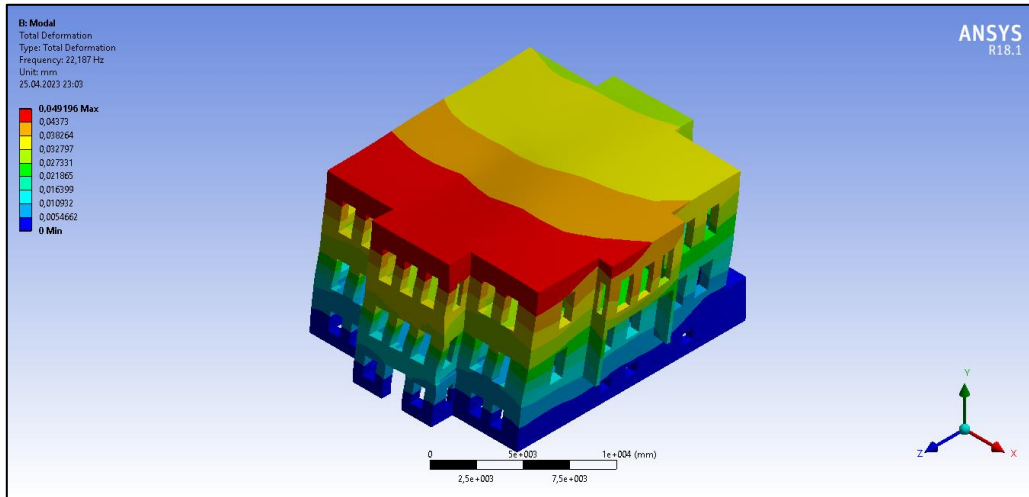
Sonlu elemanlar modeli tamamlanan Miralay Şerif Bey konağının dinamik davranışını belirleyebilmek için yapının sınır şartları belirlenmiş ve dinamik (modal) analiz yapılmıştır. 4 farklı model üzerinde yapılan analizler sonucunda yapının dinamik davranışını belirleyen en önemli parametrelerden olan yapının doğal frekansı ve mod şekilleri belirlenmiştir. Modellerde 6 adet frekans değerine karşılık gelen 6 adet mod şekli belirlenmiştir. Fakat ilk 3 mod şeklinin deprem anında baskın mod şekilleri olacağından dolayı bu çalışmada mod şekilleri incelenirken ilk 3 adet mod şekli dikkate alınmıştır. Aşağıda 4 farklı model üzerinde yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri verilmiştir.

#### 3.1 Tek tip yapı malzemesi kullanılarak oluşturulan yapı modelleri

Yapının modellenmesi aşamasında tüm yapıda tek bir yapı malzemesinin kullanılması tercih edilmiştir. Bu malzemeler izotropik malzemelerden beton ve çelik ile anizotropik malzemelerden ahşap olmak üzere 3 farklı yapı malzemesi kullanılarak 3 farklı yapı modeli elde edilmiştir. Bu şekilde yapı modellerinin oluşturulmasındaki amaç yapıda kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin ve davranışının doğrultu ve yöne göre değişip değişmemesinin yapının dinamik davranışına olan etkisini incelemektir. Çünkü özellikle yüzyıllar önce inşa edilmiş tarihi yapılarda günümüzdeki yapı modellerinin aksine daha çok mekanik özellikleri ve davranışları doğrultu ve yöne göre değişmeyen anizotropik malzemeler tercih edilmiştir. Tablo 2’de verilen frekans değerlerine göre izotropik malzemelerin anizotropik malzemelere göre daha rijit olması frekans değerlerini artırmış ve bu durumdan dolayı deprem esnasında yapılan salınım hareketinin daha kısa süreceği sonucuna varılmıştır. Modellerin analizi sonucu oluşan ilk 3 mod şekline de beklenildiği gibi ilk iki mod şekli her iki doğrultuda ötelenmenin oluşacağı, üçüncü mod şekli ise burulma etkisi olarak ortaya çıkacağı gözlemlenmiştir.

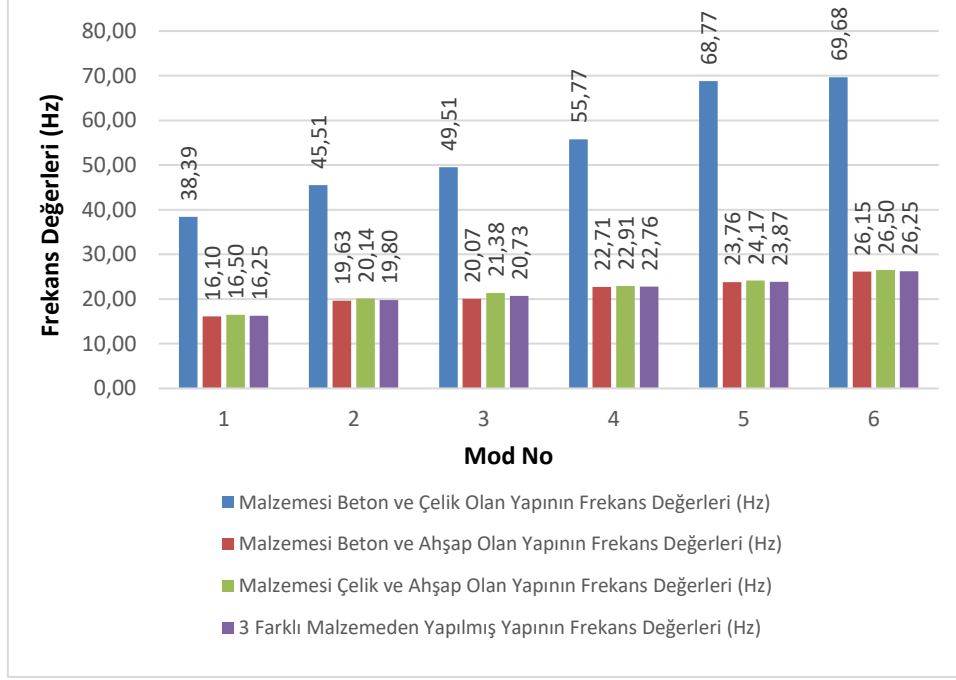
**Tablo 2.** Tek tip yapı malzemesi kullanılarak oluşturulan yapı modellerinin frekans değerleri

Malzemesi beton olan yapı modelinin dinamik analizi sonucunda oluşan 1. mod şekli aşağıda Şekil 5'de verilmektedir.

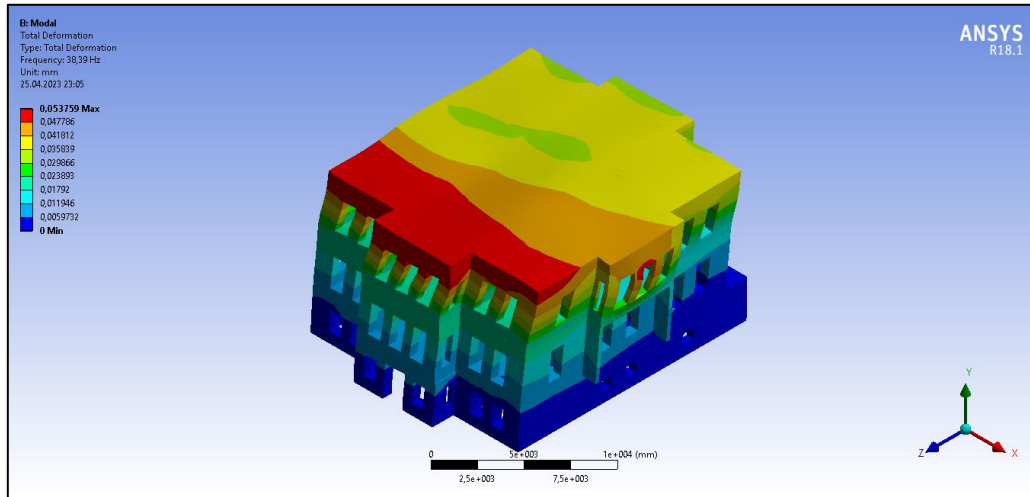
**Şekil 5.** Tek Tip Yapı Malzemesi Beton Olan Modelin 1. Mod Şekli

### 3.2 Farklı tip yapı malzemeleri kullanılarak oluşturulan yapı modelleri

Tek tip malzeme ile modellenen yapılardan farklı olarak birden fazla malzeme bu modellerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Burada yapının alt kısmındaki iki katında da rijitliği fazla olan malzeme kullanılırken, yapının en üst katında ise daha az rijit olan malzeme kullanılmıştır. Örneğin yapının zemin ve birinci katı beton malzemesi ile modellenirken ikinci katı ise ahşap malzemesi ile modellenmiştir. Aynı şekilde beton ile çeliğin ve çelik ile ahşabın da kullanıldığı modeller de bulunmaktadır. Ayrıca üç farklı malzeme türünün de rijitliklerine göre farklı katlarda kullanıldığı modelde mevcuttur. Yapılan analizler sonucunda Tablo 3' de görüleceği gibi ahşap rijitliği beton ve çeliğe göre daha az olan bir malzeme olduğu için kullanıldığı yapının frekans değerini düşürmektedir. Bu durumun tam tersi olarak çelik ise rijitliğinin diğer malzemelere göre fazla olması sebebiyle kullanıldığı yapının frekansını artırmaktadır. Mod şekilleri ise tek tip malzeme ile üretilen modellerde olduğu gibi ilk 2 mod şeklinde ötelenme üçüncü mod şeklinde burulma hareketi göstermektedir.

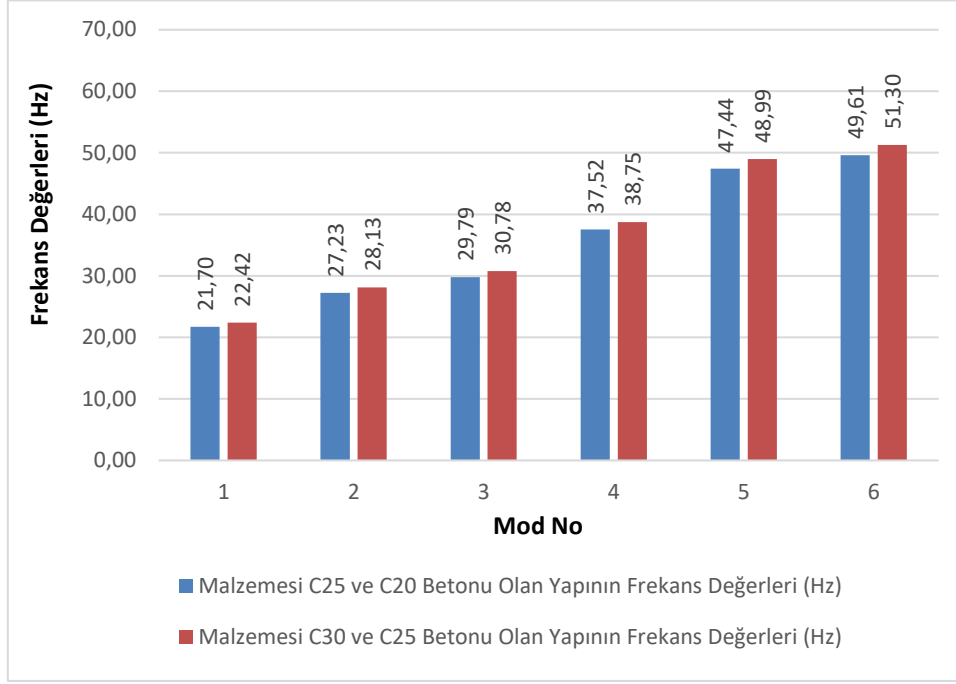
**Tablo 3.** Farklı tip yapı malzemeleri kullanılarak oluşturulan yapı modellerinin frekans değerleri

Beton ve çelik malzemesi kullanılarak modellenen yapının dinamik analizi sonucunda oluşan örnek 1. mod şekli aşağıda Şekil 6'da verilmektedir.

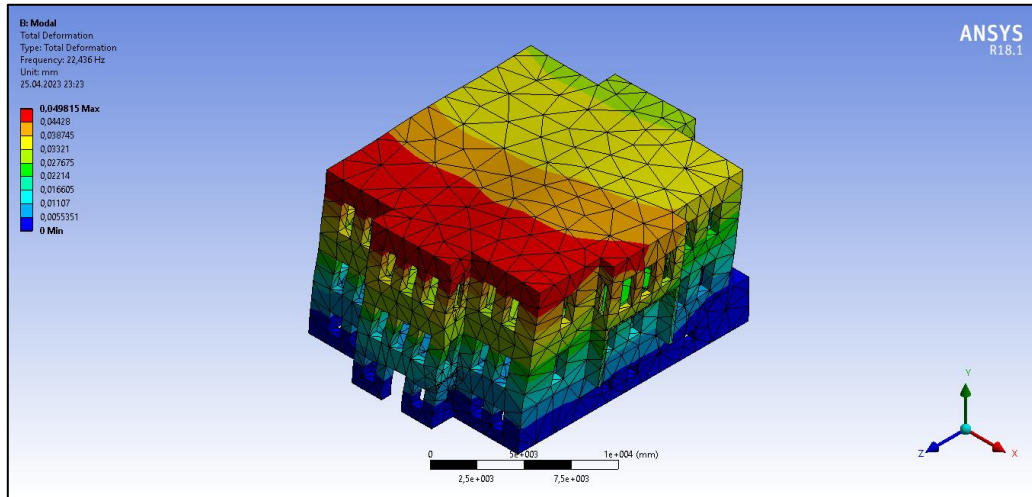
**Şekil 6.** Farklı Tip Yapı Malzemesi Beton ile Çelik Olan Modelin 1. Mod Şekli

### 3.3 Yapının katlarında farklı beton sınıfları kullanılarak oluşturulan yapı modelleri

Bu bölümde üç farklı elastisite modülüne sahip beton sınıfı modellerde farklı katlarda kullanılmıştır. Elastisite modülü fazla olan beton zemin ve birinci katta kullanılırken, elastisite modülü daha az olan beton ikinci katta kullanılmıştır. Örneğin elastisite modülü 32000 MPa olan C30 betonu zemin ve birinci katta kullanılarak ve elastisite modülü 30000 MPa olan C25 betonu ikinci katta kullanılarak yapı modellenmiştir. Aynı şekilde elastisite modülü 28000 MPa olan C20 betonu da modellerde tercih edilmiştir. Tablo 4'den de anlaşılacağı gibi kullanılan malzemenin elastisite modülü arttıkça yapı modellerinin frekansları artmakta fakat bu artışın kullanılan malzemelerin elastisite modülleri arasında çok farkın olmaması nedeniyle düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Bu durum yine de elastisite modülünün artışına bağlı olarak deprem anında yapının daha kısa sürede salınım yapmasına neden olacaktır. Mod şekilleri ise diğer modellerde olduğu gibi ilk iki mod şeklinde ötelenme üçüncü mod şeklinde burulma hareketi göstermektedir.

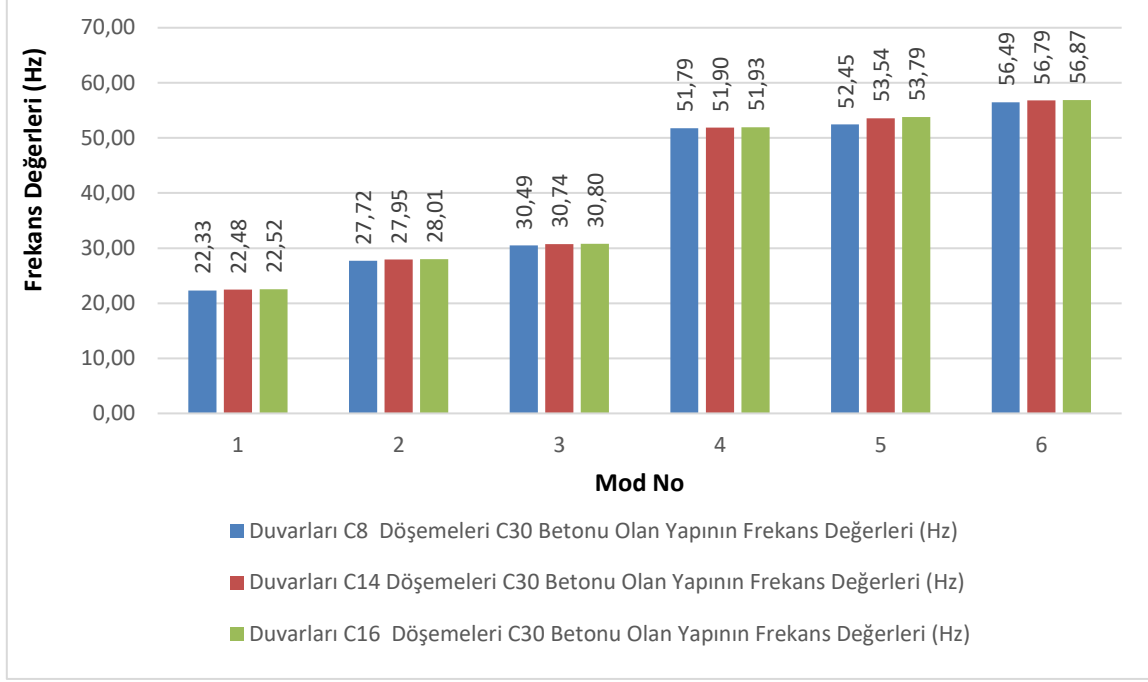
**Tablo 4.** Yapının katlarında farklı beton sınıfları kullanılarak oluşturulan yapı modelleri

Yapının katlarında C25 ve C30 betonu kullanılarak modellenen yapının dinamik analizi sonucunda oluşan 1. mod şekli aşağıda Şekil 7'de verilmektedir.

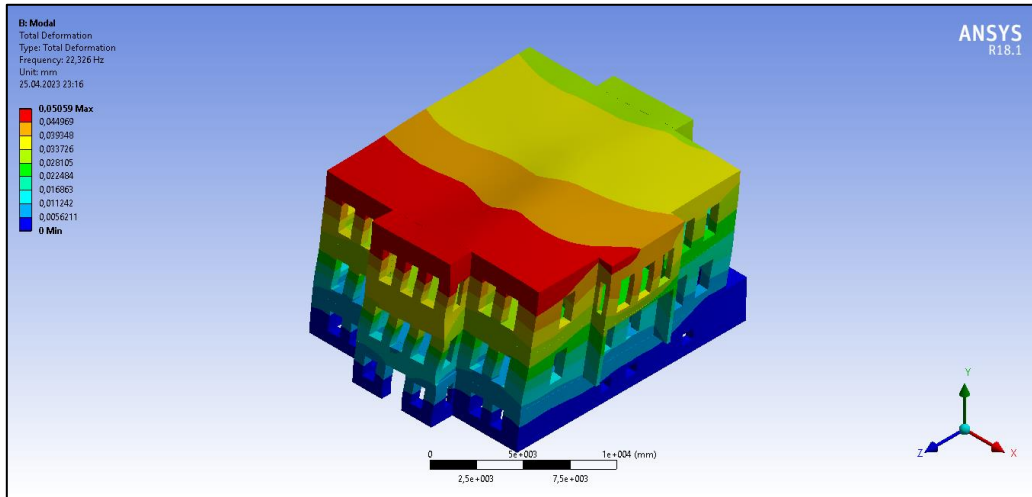
**Şekil 7.** Yapının Katlarında Farklı Beton Sınıfları Kullanılarak Oluşturulan Modelin 1. Mod Şekli

### 3.4 Yapının duvar ve döşemelerinde farklı beton sınıfları kullanılarak oluşturulan yapı modelleri

Bu aşamada ise elastisite modülü çok düşük beton ile elastisite modülü daha yüksek olduğu bir betonun yapıda beraber uygulanmasının yapının frekans ve mod şekillerinde meydana gelecek değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için bazı duvarlarda elastisite modülü çok düşük olan C8 betonu, C14 betonu ile C16 betonu kullanılırken döşemelerde ise tamamen C30 betonunun kullanılarak üç farklı yapı modellenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen veriler Tablo 5'de verilmektedir. Analiz sonucuna göre elastisite modülü ve rijitliği düşük olan beton sınıfının yapıda kullanılması yapının deprem davranışını olumsuz etkilemektedir. Mod şekillerinde ise diğer modellere göre herhangi bir değişiklik yoktur.

**Tablo 5.** Duvar ve döşemelerde farklı beton sınıfları kullanılarak oluşturulan modellerin frekans değerleri

Yapının duvar ve döşemelerinde farklı beton sınıfı kullanılarak modellenen yapının dinamik analizi sonucunda oluşan 1. mod şekli aşağıda Şekil 8'de verilmektedir.

**Şekil 8.** Yapının Duvar ve Döşemelerinde Farklı Beton Sınıfları Kullanılarak Oluşturulan Modelin 1. Mod Şekli

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada tarihi özellikleri ve işlevsel yönü nedeniyle medeniyetler için önemli olan tarihi yapıların korunması, gelecek nesillere aktarılması ve yapısal sağlığın takip edilebilmesi için ele alınan Yozgat'ta 1890 yılında inşasının tamamlandığı tahmin edilen, günümüze kadar birçok defa tadilat görmüş ve kullanım amacı değiştirilmiş üç kattan oluşan Miralay Şerif Bey konağının sonlu elemanlar metodu ile sayısal olarak modellenmiş ve dinamik analizi yapılmıştır. Yüzyıllar önce inşa edilmiş tarihi yapıların geometrisinde ve kullanılan malzemelerinde yaşanan değişimler düşünülerek ele alınan yapının 4 farklı durumda farklı şekillerle modellenmesi yapılmıştır. Bu yapı modelleri üzerinde yapılan dinamik analizler sonucunda oluşturulan yapı modellerinin dinamik parametrelerinden olan frekans değerleri hesaplanmış ve mod şekilleri belirlenmiştir. Bu dinamik parametreler yapının özellikle deprem ve rüzgar gibi dinamik yükler etkisi altındaki davranışını belirlemektedir.

Dinamik analizler sonucunda yapıda kullanılan malzemenin rijitliği arttıkça frekans değerinin artacağı ve periyot değerinin azalacağı gözlemlenmiştir. Çalışmada da görüldüğü gibi izotropik malzemelerin rijitliğinin anizotropik malzemelerin rijitliğine göre daha fazla olması sebebiyle izotropik malzemelerin kullanıldığı yapı modellerinde daha yüksek frekans değerlerinin olduğu görülmüştür. Rijitliği daha az olan anizotropik malzemenin (ahşap) farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan yapı modellerinden de görüldüğü gibi yapının sadece tek bir katında



kullanılması halinde bile frekans değeri azalmaktadır. Bu durumda anizotropik bir malzemenin yapının taşıyıcı elemanlarında kullanılması halinde olabilecek bir deprem anında yapı daha fazla salınım yapacaktır. Diğer modellerde de görülebileceği gibi elastisite modülünün artması da rijitliği artıracığından dolayı elastisite modülü büyük olan beton veya çelik gibi bir malzemenin yapıda kullanılması da frekans değerini artıracaktır. Tam tersini düşünecek olursak, yine modellenen yapılarda da görüldüğü gibi yapının taşıyıcı elemanlarını etkileyen herhangi bir deprem sonrasında yapıda elastisite modülü ve rijitliği düşen bir elemanın oluşması halinde yapının frekansı azalacak ve periyodu artacaktır. Bu durum depremin sonrasında oluşabilecek başka bir deprem veya artçı sarsıntılarda yapının daha fazla salınım yapmasına neden olabilir. Yapıların taşıyıcı sistemlerinin inşası aşamalarında gerekli beton teknolojisi kurallarına uyulmaması halinde yapının bazı taşıyıcı elemanlarının dayanımı diğer taşıyıcı elemanların dayanımına göre daha az olabilmektedir. Yapılan yapı modellerinin analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi bu gibi durumlarda yapının herhangi bir elemanın beton dayanım sınıfının diğer elemanlara göre daha düşük olması yapının deprem gibi yatay ve dinamik yükler karşısında gösterebileceği dinamik davranış performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Oluşturulan modellerin analizleri sonucunda yapının toplam yüksekliğinin artması frekans değerini azaltacaktır. Bu durum yüksek yapıların deprem esnasındaki salınımı da artıracaktır. Başka bir açıdan bakılacak olursa, yapı toplam yüksekliğinin artışı yapının kendi ağırlığını da artıracak ve bu durum yine yapının frekansını azaltacak ve yapı hem daha fazla deprem yüküne maruz kalacak hem de daha fazla salınım yapacaktır. Sonuç olarak bu nedenlerden dolayı yapıların dinamik analizi özellikle de var olan tarihi yapıların dinamik analizi deprem ve rüzgar gibi dinamik bir yük altında yapıların göçmeden ayakta kalıp kalmayacağını önceden tespit etmek ve yapıyı tekrardan modellenmesi ile birlikte gerekli yapısal sağlık takibini başlatarak yapının hasar görmesini engellemek ve servis ömrünü artırmak açısından son derece önemlidir.

### Teşekkür

Yazarlar tarihi yapının projeleri ve sanat tarihi raporunun temininde göstermiş oldukları destekten dolayı Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına bağlı Orta Anadolu Kalkınma Ajansına içten teşekkürlerini iletmektedir.

### Kaynakça

- [1] P. B. Lourenco, "Computational strategies for masonry structures," Delft University of Technology, 1996.
- [2] Y. Liu, Finite Element Method. CEA Research Laboratory Mechanical Engineering Department University Of Cincinnati, USA, 1997.
- [3] B. Ş. Şeker, F. Çakır, A. Doğançün, and A. Durmuş, "Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tarihi Erzurum Lala Paşa Cami'nin Yapısal Davranışının İncelenmesi," Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, vol. 21, no. 3, pp. 82–87, 2015, doi: 10.5505/PAJES.2014.57441.
- [4] F. Lorenzoni, F. Casarin, M. Caldon, K. Islami, and C. Modena, "Uncertainty quantification in structural health monitoring: Applications on cultural heritage buildings," Mech Syst Signal Process, vol. 66–67, pp. 268–281, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.YMSSP.2015.04.032.
- [5] İ. Çalık, İ. Yük Müh, V. Trabzon Bölge Müdürlüğü Alemdar Bayraktar, K. İnşaat Mühendisliği Bölümü, and Y. Doç Temel Türker, "Yığma ve Betonarme Kubbeli Tarihi Camilerin Deneysel Dinamik Davranışlarının Karşılaştırılması," Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları, no. 8, p. 20, 2015.
- [6] S. Russo, "On the monitoring of historic Anime Sante church damaged by earthquake in L'Aquila," Struct Control Health Monit, vol. 20, no. 9, pp. 1226–1239, Sep. 2013, doi: 10.1002/STC.1531.
- [7] A. Bayraktar, A. C. Altunışık, T. Türker, and B. Sevim, "Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi," Ankara: Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, Sep. 2007, pp. 429–440.
- [8] O. Onat and E. Sayın, "Tarihi Taşar Köprüsünün Doğrusal Olmayan Sismik Analizi," in 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, G. Balint, B. Antala, C. Carty, J.-M. A. Mabieme, I. B. Amar, and A. Kaplanova, Eds., Erzurum, 2015, pp. 301–312. doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [9] G. S. Özkaya, İ. Kazaz, and D. Okuyucu, "Kemerli Yığma Köprüsünün Sismik Davranışının Sonlu Eleman Yöntemiyle İncelenmesi," in 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, Oct. 2015, pp. 43–57.

- [10] B. Çoruhlu, T. Türker, Y. Yanık, and A. Bayraktar, "Tarihi Taş Kemer Köprülerin Modal Davranışlarının Köprü Boyutlarına Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi," in Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu , 2017, pp. 381–389.
- [11] Y. Ghanaat, R. W. Clough, and B. B. Redpath, "Experimental Study of Dam-Water-Foundation Interaction," in Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 1992, pp. 1573–1578.
- [12] Ö. Mutlu and A. Şahin, "Investigating The Effect Of Modeling Approaches On Earthquake Behavior Of Historical Masonry Minarets-Bursa Grand Mosque Case Study," Sigma J Eng & Nat Sci 7, vol. 7, no. 2, pp. 123–136, 2016.
- [13] M. Turek, C. Ventura, and P. Placencia, "Dynamic Characteristics of a 17 th Century Church in Quito, Ecuador," in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002.
- [14] A. Koçak and T. Köksal, "An example for determining the cause of damage in historical buildings: Little hagia sophia (Church of St. Sergius and Bacchus) – Istanbul, Turkey," Engineering-Failure-Analysis, vol. 17, no. 4, pp. 926–937, Jun. 2010.
- [15] Ö. Dabanlı, F. Çılı, and Y. Kahya, "Nur-u Osmaniye Camii'nin Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi," Restorasyon Yıllığı Dergisi, no. 10, pp. 46–57, 2015.
- [16] B. Sayın, "Tarihi yığma yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve uygulama önerileri," Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 7, no. 3, pp. 387–398, 2016.
- [17] E. Diz-Mellado et al., "Non-destructive testing and Finite Element Method integrated procedure for heritage diagnosis: The Seville Cathedral case study," Journal of Building Engineering, vol. 37, p. 102134, May 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.102134.
- [18] L. Guerriero, M. Guadagnuolo, I. Titomanlio, and G. Faella, "An integrated approach for the conservation of archaeological buildings: The 'Re Barbaro' Palace in Sardinia," Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, vol. 27, p. e00244, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.DAACH.2022.E00244.
- [19] T. Çaylar, "Yozgat Miralay Konağı Sanat Tarihi Raporu," Kayseri, 2015.

## Kablosuz Deri Kanser Takip Sistemleri için Kot-kumaş Tabanlı Giyilebilir Çatal Şeklinde Ultra Geniş Bant Anten

Emine AVŞAR AYDIN\*<sup>1</sup> 

\*<sup>1</sup> Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Aerospace Engineering, ADANA

(Alınış / Received: 10.11.2023, Kabul / Accepted: 27.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Ultra-geniş bant,  
Esnek anten,  
Geri dönüş kaybı (S<sub>11</sub>),  
Duran dalga oranı  
(VSWR),  
Kazanç,  
Kablosuz sağlık izlemi

**Öz:** Son zamanlarda, insanlarla sağlık hizmeti sağlayıcıları arasında sorunsuz iletişimi kolaylaştırmak amacıyla esnek giyilebilir antenler kullanan kablosuz sağlık izleme sistemlerine olan talep hızla artmaktadır. Bu bilimsel araştırmanın temel amacı, ekonomik olarak uygulanabilir, denim üzerine özenle tasarlanmış kumaş tabanlı esnek giyilebilir bir anten tasarımının operasyonel verimliliğini değerlendirmek, özellikle de kablosuz sağlık izleme alanındaki uygulanabilirliğine odaklanmaktadır. Bu antenin önemli bir özelliği, fiziksel boyutunun minimum olmasıdır ve 50 mm × 35 mm × 1.0 mm ölçülerindedir; ayrıca, 2.44 GHz 'de yaklaşık %96.7 ve 7.66 GHz 'de %96.2 gibi yüksek verimliliklere sahip olarak mükemmel performans sergilemektedir. 7.66 GHz frekansında sırasıyla 4.32 dBi ve 4.87 dBi olarak ölçülen yüksek kazanç ve doğruluk özellikleri de dikkat çekicidir. Bu ultra geniş bant (UWB) antenin önemli vurguları, kompakt form faktörü, hafif yapısı, maliyet etkinliği, doğal esneklik, basit üretim süreci ve giyimle sorunsuz entegrasyonu içermektedir. Bu özel özellikler, onu kablosuz vücut alanı ağı (WBAN) sistemlerine özgü olarak özel olarak tasarlanmış bir giyilebilir insan vücut anteni olarak uygun kılan unsurları vurgular. Özellikle, yukarıda bahsedilen anten tasarımının hem simülasyon hem de ölçüm sonuçları, özellikle ultra geniş bant operasyonları bağlamında, WBAN uygulamaları için üstünlüğünü ve uygunluğunu doğrulamaktadır.

## Denim-Based Wearable Fork-Shaped Ultra-Wideband Antenna for Wireless Skin Cancer Monitoring Systems

### Keywords

Ultra-wideband (UWB),  
Flexible antenna,  
Return loss (S<sub>11</sub>),  
Voltage standing wave  
ratio (VSWR),  
Gain,  
Wireless health  
monitoring

**Abstract:** Recently, there has been a burgeoning demand for wireless health monitoring systems employing flexible wearable antennas to facilitate seamless communication between individuals and their healthcare providers. The principal objective of this scholarly investigation revolves around assessing the operational efficiency of an economically viable, fabric-based flexible wearable antenna design meticulously fashioned on denim, with a specific focus on its applicability in wireless health monitoring. The significant feature of this antenna is its minimal physical size, measuring 50 mm × 35 mm × 1.0 mm, and it also draws attention as an antenna with excellent performance, boasting high efficiencies of approximately 96.7% at 2.44 GHz and 96.2% at 7.66 GHz. It exhibits commendable attributes in high gain and directivity, quantified at 4.32 dBi and 4.87 dBi, respectively, at a frequency of 7.66 GHz. The pivotal highlights of this ultra-wideband (UWB) antenna encompass its compact form factor, lightweight construction, cost-effectiveness, inherent flexibility, straightforward fabrication process, and seamless integration into clothing. These distinctive attributes underscore its suitability as a wearable human body antenna tailor-made for deployment within wireless body area network (WBAN) systems. Notably, both the simulation and measurement outcomes of the abovementioned antenna design corroborate its preeminence and suitability for WBAN applications, particularly in the context of ultra-wideband operations.

\*İlgili Yazar, email: eaydin@atu.edu.tr

## 1. Introduction

The utilization of textile antennas represents a pioneering paradigm within apparel. This innovative concept introduces multifaceted functionalities to garments, transcending their conventional roles. These enhanced attributes encompass the capacity for sensory perception and communication and the capability to effectuate actions while affording a safeguarding interface against external elements. Sensory perception entails the strategic integration of sensors directly into clothing fabric. These sensors are adept at capturing diverse physiological parameters emanating from the human body, including but not limited to temperature and respiration rate. This convergence of technology and attire engenders a symbiotic relationship between the wearer and the textile, wherein the garments become an interface for continuous physiological monitoring. The integration of wearable antennas into the fabric further amplifies the functionality of materials by facilitating wireless communication between the human body and the ambient environment. This symbiosis, often referred to as body-centric communication, transcends the boundaries of traditional communication methods, enabling a seamless exchange of information without the constraints of physical devices. This technological fusion augments the connectivity of the individual and seamlessly integrates the digital realm with the physical self.

The apex of this paradigm is realized through actuating capabilities, wherein actuators are seamlessly embedded within the fabric of garments. These actuators serve the purpose of notifying and alerting the wearer regarding specific events or triggers by employing auditory alarms or visual notifications. This proactive communication mechanism engenders heightened awareness and responsiveness, seamlessly melding the digital and human dimensions. In summation, the advent of textile antennas heralds a transformative epoch in attire. Garments evolve into intelligent interfaces that transcend traditional roles by amalgamating sensory perception, body-centric communication, and actuating functionalities. This confluence of textile engineering and cutting-edge technology expands the horizons of human-attire interaction. It exemplifies the potential of smart textiles to redefine the boundaries of both fashion and function [1]–[3].

Due to its unique composition and operational characteristics, a textile antenna is a distinct and divergent archetype juxtaposed with conventional antennas. In stark contrast to the rigidity inherent in traditional antenna construction, textile antennas are predominantly or entirely fashioned from textile materials, circumventing the necessity for inflexible substrates prevalent in conventional antenna designs. The pliability intrinsic to textile antennas is a striking departure from the established norms of antenna engineering, affording them a remarkable degree of flexibility that is inherently absent in their traditional counterparts. The composite structure of textile antennas is predicated upon the amalgamation of two distinct categories of fabrics: conductive and non-conductive. Within this construct, conductive fabrics play an instrumental role by serving as conduits for the propagation of electromagnetic waves. These fabrics are strategically employed as conductive patches, enabling efficient and effective wave transmission and reception.

Conversely, non-conductive fabrics, forming the substrates of textile antennas, engender a structural foundation that supports the functional components. These non-conductive substrates contribute significantly to the textile antenna's mechanical integrity and stability. The efficacy and performance attributes of textile antennas, encompassing metrics such as gain, bandwidth, efficiency, and reflection coefficient, are inherently contingent upon the specific fabric types employed during construction. The dielectric constant of the substrate material emerges as the pivotal determinant in this regard, exerting a pronounced influence on the antenna parameters. Notably, the choice of fabric directly governs the substrate's dielectric properties, thereby wielding a pivotal power over the ultimate operational characteristics of the textile antenna. The textile antenna represents an innovative departure from the established landscape of antenna design, redefining the conventional norms through its textile-based composition and inherent flexibility. The dichotomy between conductive and non-conductive fabrics forms the foundation for its functional architecture, with the former enabling electromagnetic propagation and the latter bestowing structural robustness. The intricate interplay between fabric selection, dielectric constants, and resultant antenna attributes underscores the paramount role of textile composition in shaping the antenna's performance landscape [2]–[5].

Crucial attributes governing the selection and application of textile materials in the context of antenna design encompass a range of factors, including the dielectric constant, fabric thickness, surface resistivity of conductive fabrics, moisture content of textiles, and the mechanical behavior exhibited by both dielectric and conductive fabric components. The interplay of these attributes significantly influences the overall performance and effectiveness of textile-based antennas. Various textile materials have found utility in constructing antennas, each harboring distinctive characteristics and potentialities. These materials include Vellux, synthetic felt, Cordura, fleece, and upholstery fabric. The composition and attributes of these materials hold implications for the resultant antenna's functionality. Concomitantly, the conductive aspect of textile antennas relies on fabrics imbued with conductive properties. Examples encompass woven fabrics endowed with nickel plating, knitted fabrics enriched

with silver leaf, and woven fabrics adorned with composite silver copper-nickel plating. Additional instances contain specialized conductive fabrics such as Flectron and Zelt, contributing to the diverse material choices available for textile antenna construction (Salvado et al., 2012).

The seamless integration of antennas into textile-based garments and their optimal positioning on the human body hinge upon specific criteria. Notably, these antennas manifest compact dimensions and forms, rendering them amenable to unobtrusive placement. This diminutive stature of textile antennas is often embodied through microstrip or patch antenna configurations. These configurations, predominantly microstrip and patch antennas, have surfaced as suitable solutions for various applications, including but not limited to aviation, military hardware, and communication systems. Their discreet design and robust performance attributes render them efficacious choices for contexts where space constraints and inconspicuousness are paramount considerations [7]. The proliferation of wearable devices has garnered prominence across both civilian and military spheres, primarily attributed to their heightened utility in facilitating communication endeavors. Additionally, these devices have observed increased adoption within local area networks (LANs) and wide area networks (WANs), where the assurance of secure data transmission is paramount. Noteworthy is the application of wearable technology in the context of textile sensors, which prominently feature in monitoring physiological parameters. Of particular significance is the utilization of Bluetooth-enabled interfaces to seamlessly transmit the acquired physiological data, particularly heart rate measurements, to interconnected smart devices such as smartphones [8]. The ambit of e-textiles further expands the repertoire of physiological signals amenable to monitoring [9], [10], enriching the potentialities of wearable technology in health and performance monitoring. The fabrication process is central to successfully designing and realizing wearable textile antennas. This pivotal task encompasses a range of methodologies tailored to the textile context. Foremost among these is employing flexible copper sheets, a pragmatic and uncomplicated approach for realizing antenna patches and accompanying ground planes. This fabrication method emerges as an economically reasonable and time-efficient solution, effectively contributing to streamlining the production process [11].

In contemporary times, the integration of wireless body area networks within the domain of biomedical applications has substantially permeated everyday existence [12]–[15]. In this landscape, wearable antennas emerge as a distinctive subset of patch antennas, uniquely tailored to operate with the human form while worn [16]. The proliferation of wearable technology presents a burgeoning prospect, potentially mitigating medical errors and enhancing the overall caliber of healthcare provisions within medical facilities. The scope of this endeavor encompasses the conceptualization and implementation of a wearable antenna optimized for medical applications. This endeavor is particularly resonant in light of the imperative nature of early detection of many life-threatening ailments, whereby timely identification can be instrumental in instigating life-saving interventions [15], [17]. In recent years, the domain of ultra-wideband applications has witnessed a notable surge in interest directed towards medical imaging applications. Among these applications, ultra-wideband (UWB) microwave imaging is promising in biomedical contexts. Its capacity for profound tissue penetration and commendable resolution underscores this, positioning it as a potent modality for identifying malignancies like cancer. Within this overarching context, the present study begins designing and developing an antenna primed for delineating skin cancerous tissues, thereby capitalizing on the intrinsic capabilities of UWB microwave imaging [18].

Ultra-Wideband (UWB) antennas are types of antennas that enable communication over broad frequency bands and facilitate high-speed data transfer. These antennas play a significant role, particularly in the field of wearable technology. In this context, the design, simulation, and production of a flexible UWB antenna integrated into denim fabric can offer various advantages in wearable technology applications. The flexible structure of denim fabric provides an ideal material for the design of wearable devices, offering comfort and freedom of movement. Integrating a UWB antenna into this fabric can provide communication capabilities that are discreetly embedded in the clothing the user wears. This represents a crucial step in the design of wearable technology devices, emphasizing aesthetics and functionality. The simulation process plays a critical role in optimizing the design and improving antenna performance. The simulation of the UWB antenna integrated into denim fabric takes into account factors such as material properties, antenna dimensions, and placement to achieve the best performance. During the production phase, considerations include the availability of flexible materials and their compatibility with wearable technology. Flexible Printed Circuit Board (PCB) technologies and specialized production processes enable the manufacturing of UWB antennas integrated into denim fabric. This facilitates better integration of wearable technology products into industrial production processes. Flexible UWB antennas integrated into denim fabric find applications across a wide range of wearable technology, including health monitoring, location tracking, and interactive wearable applications. For instance, health monitoring devices can continuously track vital signs such as body temperature and heart rate. In location tracking applications, precise location data can be transmitted to determine the user's exact whereabouts. In conclusion, flexible UWB antennas integrated into denim fabric play a significant role in making wearable technology more functional and user-friendly. These designs, by combining

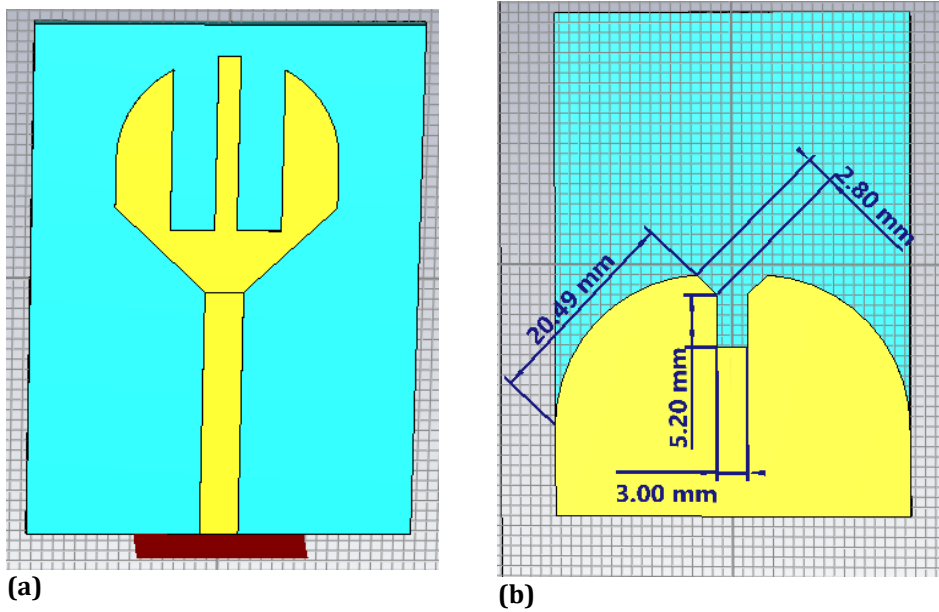
fashion and technology, have the potential to enhance the user experience and integrate wearable technology seamlessly into daily life.

This paper comprehensively explores the development, simulation, and fabrication of a flexible Ultra-Wideband (UWB) antenna seamlessly integrated into denim fabric, with a specific focus on its applicability in wearable technology. The study entails a systematic investigation aimed at optimizing the geometric configuration of the antenna through a parametric analysis, shedding light on the influence of dimensional variations on its overall performance. The simulation results of the designed antenna closely align with the empirical findings obtained from the physical prototype. Remarkably, the fabricated antenna exhibits exceptional fidelity to the simulation data, achieving an impressive 96.2% accuracy in the S11 parameter and a 96.7% accuracy in the gain value when compared to the simulated outcomes. The antenna's peak simulated gain and directivity reach noteworthy levels at 2.4 dBi and 4.87 dBi, respectively, while offering a substantial impedance bandwidth spanning 1.8 GHz, ranging from 2.12 to 10.04 GHz. This remarkable bandwidth maintains a minimum impedance matching of -47.64 dB for S11 and -42.65 dB, showcasing its outstanding performance. Notably, the physical dimensions of the fabricated antenna are compact, measuring 50 mm × 35 mm × 1.0 mm, with a peak gain of 4.4 dB. It is worth emphasizing that this UWB antenna design surpasses the performance of comparable antennas documented in existing literature, establishing its suitability for applications in wearable technology, particularly within the context of Wireless Body Area Networks (WBANs) used for wireless health monitoring. As a prospective avenue for further investigation, the antenna presented in this study can be subjected to tests involving various antenna parameters to accommodate a range of human body movements and positions. This endeavor holds the potential to enable diverse applications in the realms of human body movement recognition and classification.

## 2. Material and Method

In the suggested configuration of the Fork-shaped microstrip patch antenna, the fundamental structure involves a denim substrate between the upper conductor, functioning as a Fork-shaped radiating patch, and the lower conductor, serving as a ground. Fabrication of the designed antenna takes place on a denim substrate with dimensions measuring 35 mm × 50 mm × 1 mm. Using denim as a substrate presents an optimal selection for a wearable and pliable antenna within a wireless health monitoring system. This preference stems from its ability to manifest sought-after attributes, encompassing cost-effectiveness, elevated flexibility, minimal mass, substantial mechanical resilience, and requisite radiation properties. This substrate possesses a relative permittivity of 1.7 and a loss tangent of 0.025. The ground plane and the radiating patch are constructed utilizing adhesive copper tape, which exhibits a conductivity of  $5.88 \times 10^7$  S/m and has a thickness of 0.035 mm. A microstrip feed line is integrated to achieve impeccable impedance matching of 50  $\Omega$  for the fabricated antenna. This feed line features 13.5 mm × 2.85 mm dimensions and is connected to a Sub-Miniature Version A (SMA) connector. The design framework of the proposed antenna, encompassing the radiating patch, substrate, and ground, is visually represented in Figure 1. Specific antenna design measurements are outlined in detail in Table 1.

Optimization and parametric exploration are undertaken by subjecting various parameter specifications to variation. This comprehensive approach is aimed at attaining the ultimate design configuration. These tasks are executed employing the Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio, which serves as the designated software for antenna simulation. The optimized design incorporates strategically placed slots within the radiating patch and the ground to enhance the antenna's performance. This innovative addition contributes to superior impedance matching, expanded bandwidth, minimal bending impacts, reduced electromagnetic deposition, and decreased overall size due to eliminating excess metallic components.



**Figure 1.** Fork-shaped UWB-antenna in CST Simulation (a) Radiating patch geometry (b) Ground structure.

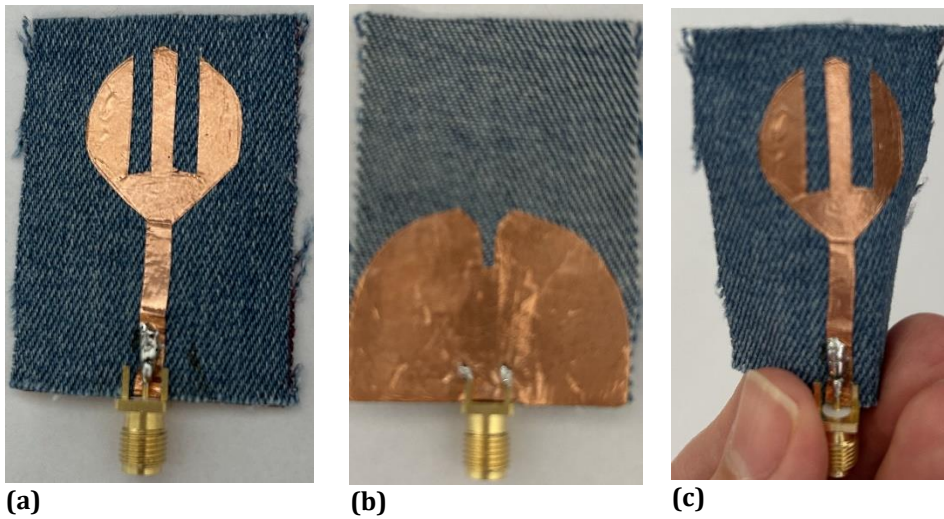
**Table 1.** Dimensions of the proposed antenna.

Antenna Design Parameters	Dimensions (mm)
Substrate width ( $W_s$ )	35
Substrate length ( $L_s$ )	50
Patch width ( $W_p$ )	20
Patch length ( $L_p$ )	23
Feed length ( $L_f$ )	24
Feed width ( $W_f$ )	3.5
Slot length ( $L_{s1}, L_{s2}$ )	16.95
Slot width ( $W_{s1}, W_{s2}$ )	4
Ground width ( $W_g$ )	35
Ground length ( $L_g$ )	24
Thickness of substrate ( $h$ )	1
Thickness of copper tape ( $t$ )	0.035
Blend radius ( $Br$ )	10
Blend ground ( $Bg$ )	15
Chamfer ground ( $Cg$ )	2

The procedure encompassing the conceptualization and production of a pliable antenna intended for wearability involves several sequential stages. Firstly, the choice of substrate material takes place in tandem with the consideration of other design factors aligned with the particular requisites of the application. Subsequently, determining the antenna's geometry and dimensions is established, a pivotal step in achieving the desired functionality. The deployment of an electromagnetic (EM) simulator, such as CST, is then executed, engaging in iterative simulations until the targeted performance metrics are attained, signifying the antenna's operational efficiency. Following this, preparing a textile-based adaptable substrate tailored to the application's specifications takes precedence, ensuring optimal compatibility. The manufacturing stage entails the precise crafting of the antenna. This entails the accurate segmentation of self-adhesive conductive copper tape and the chosen substrate material (in this case, denim), with the subsequent adhesion of the copper tape onto the substrate's surface. Integrating the SMA connector ultimately culminates the process, facilitating seamless connectivity and finalizing the wearable, flexible antenna's assembly. The testing and measurement of the designed antenna parameters were carried out using a handheld LITEVNA (24) vector analyzer.

In this study, the selection of textile denim fabric as the substrate for designing and realizing a flexible wearable UWB antenna is exemplified in Figure 2 (a). The antenna of focus is meticulously planned, virtually simulated, and refined using CST simulation software, employing a frequency-domain solver. The technique of employing copper tape is harnessed for the antenna's construction, wherein a 0.035 mm thick adhesive copper tape is affixed to serve as both the radiating patch element and a ground plane structure on the denim fabric substrate. This highly conductive material is well-suited for the antenna's economical fabrication. To facilitate the operational capacity of the constructed antenna, a 50  $\Omega$  SMA connector is linked with a microstrip feed line. As depicted in Figure 2 (b), the flexible fabric-based wearable antenna spotlighted in this work exhibits high suitability for applications

involving body-worn setups, attributable to its inherent conformability and resilience that enable its attachment to non-planar, bent, or curved surfaces.

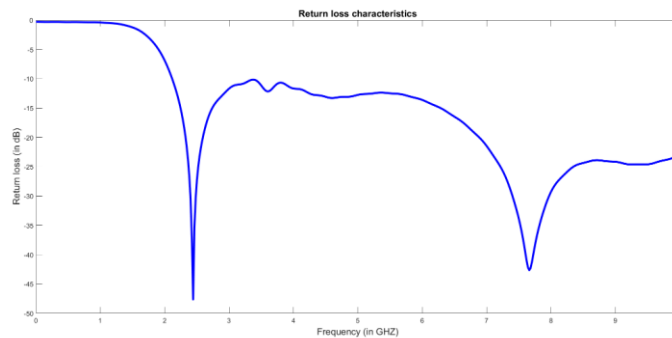


**Figure 2.** Front view of the produced antenna (a), Photo of the backside or ground side of the produced antenna (b), and Flexible denim-based wearable antenna (c).

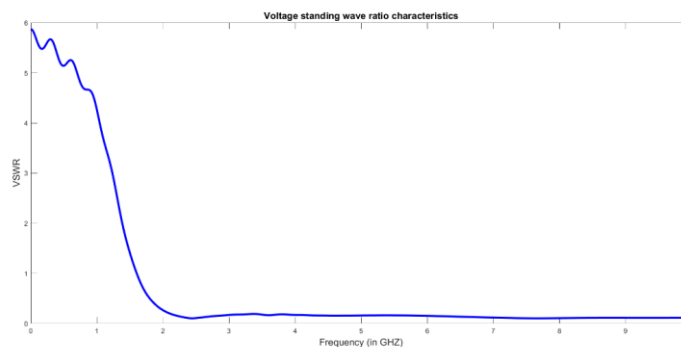
### 3. Simulation outcomes and parametric study findings

Return loss, also known as reflection coefficient or  $S_{11}$ , and Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) represent critical metrics for assessing antenna performance and analyzing power losses within the antenna system. In an ideal scenario, conditions are perfect, and the antenna should reflect no power. However, practical situations often involve imperfections, discontinuities, or impedance mismatches between the feed line and radiating patch, resulting in some power being reflected.

For reliable performance, it is generally accepted that  $S_{11}$  should have a minimum value of -10 dB and a VSWR value of around 2.0 is considered suitable. In the simulation of our design, we observed an  $S_{11}$  of -47.64 dB and -42.65 dB at frequencies of 2.44 GHz and 7.66 GHz, respectively. The corresponding VSWR values were measured at 1.22 and 1.12 for 2.44 GHz and 7.66 GHz, respectively. Visual representations of these metrics are provided in Figure 3.



**(a)**

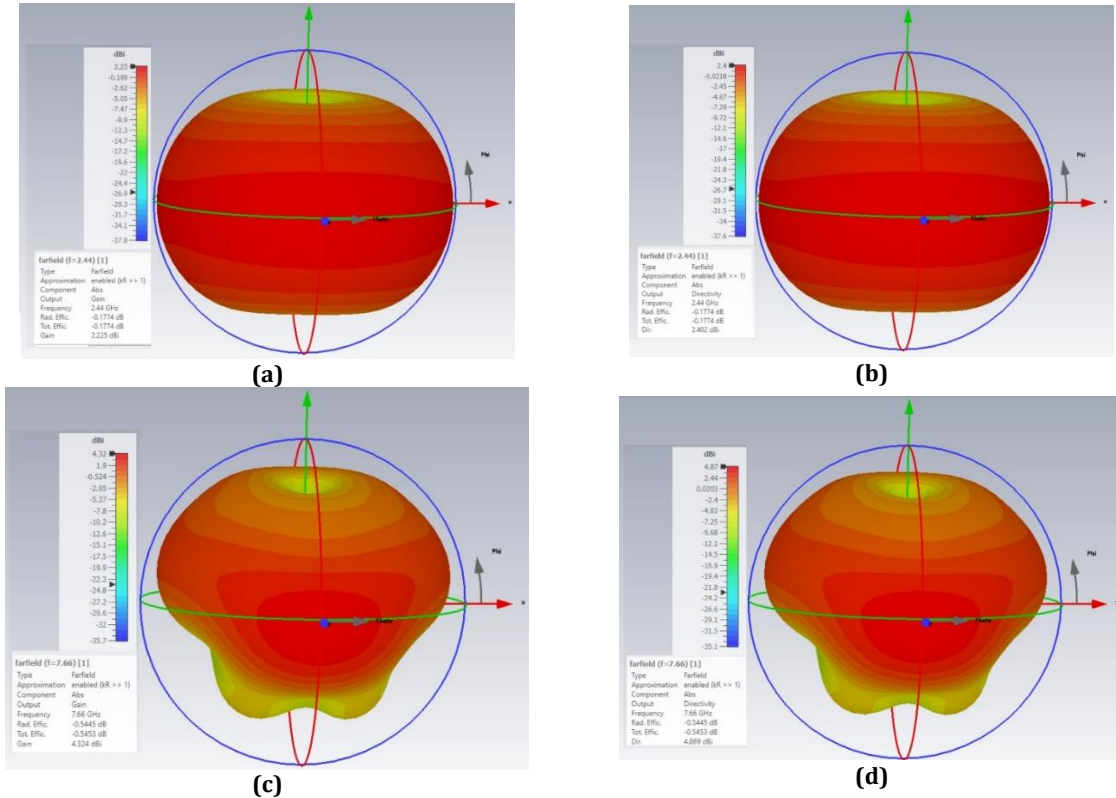


**(b)**

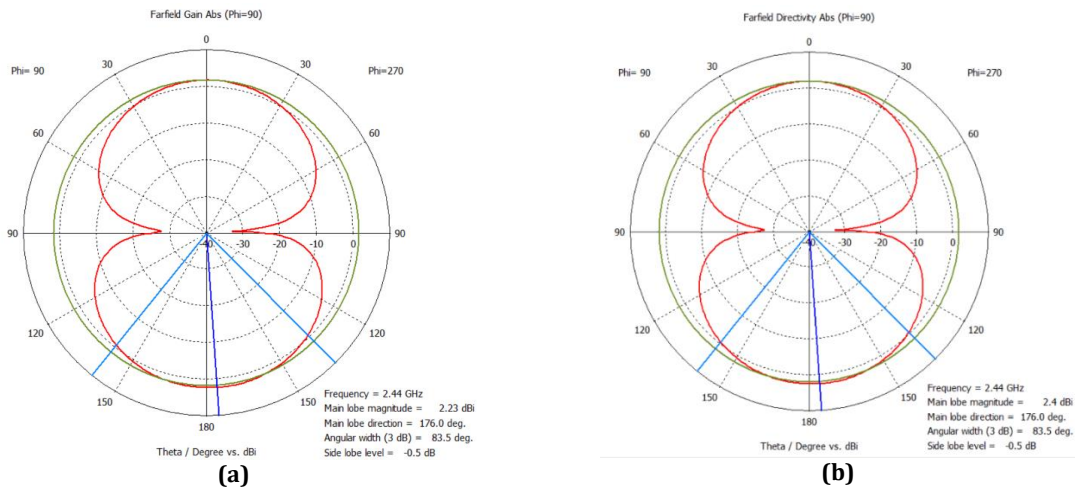


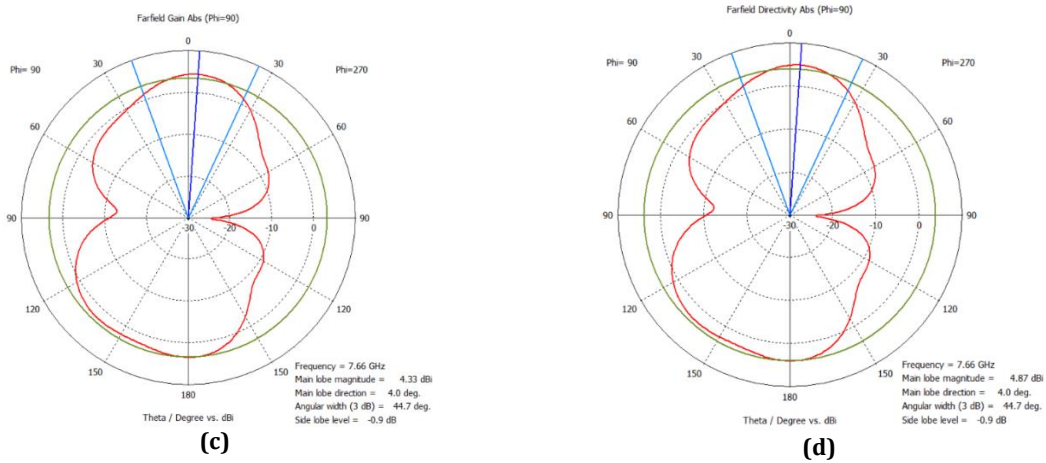
**Figure 3.** Simulated return loss (a) and VSWR (b) characteristics.

Radiation patterns illustrate the variation of radiation power in different directions from the antenna. In our analysis, we present 3D radiation pattern plots in Figure 6 to depict gain and directivity at frequencies of 2.44 GHz and 7.66 GHz. Additionally, 2D polar fields of radiation patterns are displayed in Figure 5 for the resonance frequencies of 2.44 GHz and 7.66 GHz. Figure 4 shows that at 2.44 GHz, the simulated gain and directivity are 2.23 dBi and 2.4 dBi, respectively. At 7.66 GHz, the gain and directivity of the proposed antenna measure at 4.32 dBi and 4.87 dBi, respectively.



**Figure 4.** Simulated gain and directivity graphs at resonance frequencies. (a) Gain at 2.44 GHz, (b) Directivity at 2.44 GHz, (c) Gain at 7.66 GHz, (d) Directivity at 7.66 GHz.

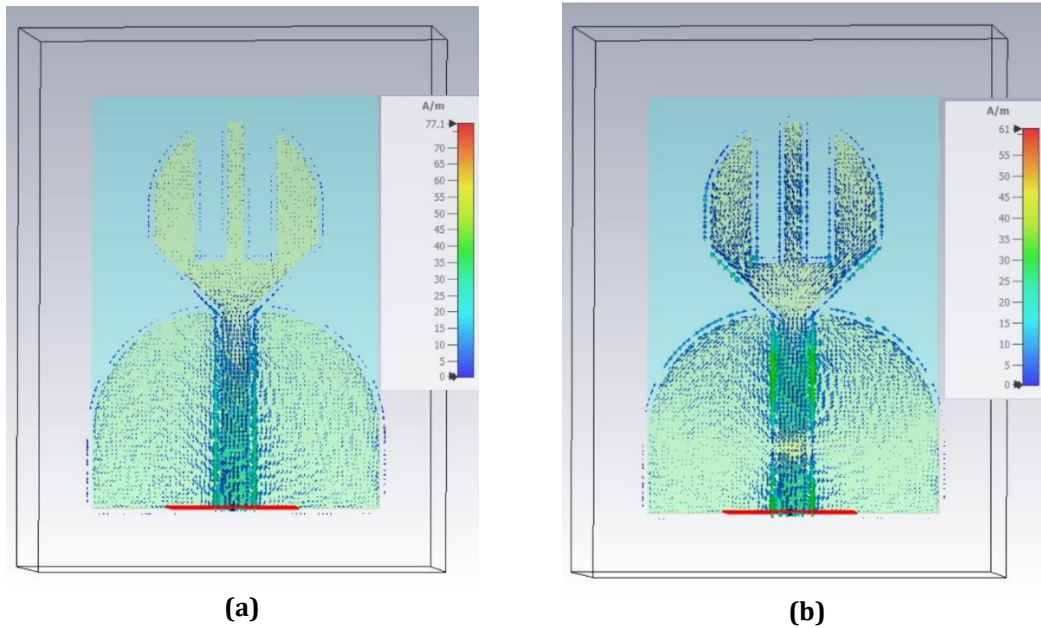




**Figure 5.** Radiation pattern graphs at resonant frequencies. (a) Radiation pattern gain at 2.44 GHz, (b) Radiation pattern directivity at 2.44 GHz, (c) Radiation pattern gain at 7.66 GHz, (d) Radiation pattern directivity at 7.66 GHz.

To demonstrate the influence of slots on the designed antenna, we comprehensively analyze the simulated surface current distributions at two distinct frequencies, namely 2.44 GHz and 7.66 GHz. These simulations were conducted at the phase of 0°, and the results are meticulously showcased in Figure 6.

A thorough examination of these figures reveals that the electric dipole exhibits maximum surface current concentration primarily along the feed line, the edges of the slots, and the truncated ground. Moreover, it is noteworthy that the surface current distribution undergoes significant variations with the phase change. Furthermore, to offer a comprehensive overview of the antenna's performance characteristics, we have compiled a detailed summary of the simulation outcomes in Table 2. This table encapsulates crucial data of the presented antenna's performance parameters, providing a holistic perspective on its performance under different conditions.



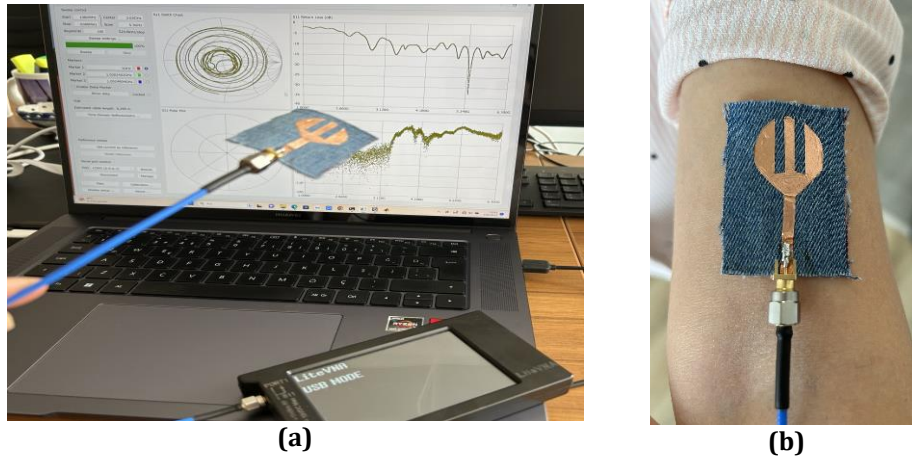
**Figure 6.** Surface current distribution at phase 0° (a) at 2.44 GHz and (b) at 7.66 GHz.

**Table 2.** Simulation-based evaluation of antenna performance.

Antenna performance parameters	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
Resonant frequency (GHz)	2.44	7.66
Return loss S <sub>11</sub> (dB)	-47.64	-42.65
VSWR	1.22	1.12
Gain (dBi)	2.23	4.32
Directivity (dBi)	2.4	4.87
Efficiency (%)	96.7	96.2
Impedance bandwidth (GHz)	1.18	-

#### 4. Experimental Results and Discussions

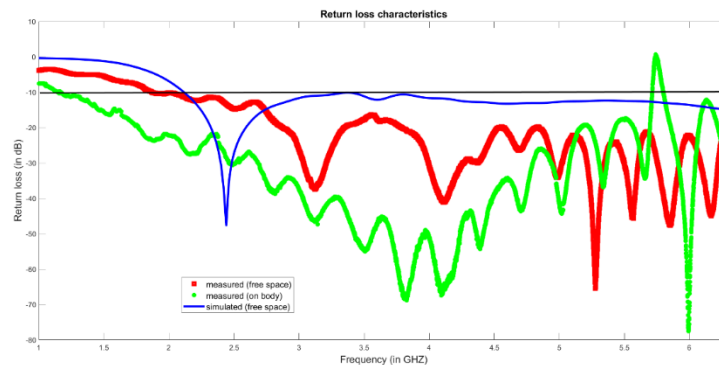
The  $S_{11}$  parameter of the presented antenna was measured using a handheld Vector Network Analyzer (LiteVNA) with a frequency range from 1 GHz to 6.3 GHz. Figure 7 (a) illustrates the proposed denim-fabric-based flexible antenna measurement using the VNA. This new research specifically examined and demonstrated the on-body effect of wearable UWB antenna design on return loss ( $S_{11}$ ) characteristics for potential use in skin cancer detection studies. The antenna was placed on the body's right arm to illustrate the on-body return loss effect of the wearable antenna, and measurements were repeated, as shown in Figure 7 (b).



**Figure 7.** Return loss ( $S_{11}$ ) measurement using a vector network analyzer (a), measurement of on-body influence (b).

The present study delved into exploring the impact of wearable UWB antenna design on  $S_{11}$  characteristics when positioned on the human body. The antenna was affixed to the left arm to elucidate the on-body return loss effect of the wearable antenna, as depicted in Figure 7 (b). Figure 8 illustrates simulated and measured  $S_{11}$  characteristics in two distinct settings: free-space and on-body wearable conditions.

As evident from Figure 8, a marginal discrepancy was discernible in the  $S_{11}$  measurements between free-space and on-body conditions. These disparities in measurements were primarily attributable to the dynamic movements of the human body, encompassing bending and twisting, as well as the partial absorption of radiated energy by bodily tissues. Furthermore, there was a commendable convergence between the simulated and assessed reflection coefficients in free-space conditions, demonstrating an accuracy rate of 90.5%. In contrast, the accuracy rate of the presented fabricated antenna under on-body conditions was 72.4%.



**Figure 8.** A comparison graph of return loss characteristics for measurements in a simulation environment (free space, measured (free space), and measured (on body)).

#### 5. Conclusion

This paper provides a comprehensive account of developing, simulating, and fabricating a flexible Ultra-Wideband (UWB) antenna integrated into denim fabric for wearable applications. The research encompasses a parametric study to optimize the antenna's geometric configuration and elucidate the impact of dimensional variations on its performance. The simulation results for the designed antenna exhibit a remarkable congruence with the empirical outcomes derived from the fabricated prototype. The fabricated antenna demonstrates a noteworthy level of fidelity to the simulation data, boasting an impressive 96.2% accuracy in the  $S_{11}$  value and a 96.7% accuracy in the

gain value compared to the simulated results. The peak simulated gain and directivity reach values of 2.4 dBi and 4.87 dBi, respectively, accompanied by a substantial impedance bandwidth spanning 1.8 GHz, ranging from 2.12 to 10.04 GHz, representing an impressive -47.64 dB and -42.65 dB, respectively, as the minimum impedance matching of  $S_{11}$  over the bandwidth. The physical dimensions of the fabricated antenna exhibit a compact form factor, measuring 50 mm × 35 mm × 1.0 mm, and the peak gain measures 4.4 dB. Importantly, this UWB antenna design demonstrates superior performance characteristics compared to similar antennas referenced in the literature (Table 3), underscoring its suitability for wearable applications in wireless health monitoring within the context of Wireless Body Area Networks (WBANs). As a prospective avenue for further research, the antenna, as presented in this study, can be tested for various antenna parameters to accommodate different human body movements and positions. This exploration holds the potential to facilitate diverse applications in human body movement recognition and classification.

**Table 3.** Analyzing Antenna Performance: A comparative study between the presented antenna and similar WBAN textile antennas found in the literature.

[Ref.]	Antenna Dimensions	Substrates	Resonant Frequency (GHz)	$S_{11}$ (dB)	Gain	Directivity (dBi)	Impedance bandwidth (GHz)
[19]	50 x 50 x 1.5 mm <sup>3</sup>	Rogers RO4003	4.0 6.0 9.0 11.0	Minimum impedance matching of $ S_{11} $ over the bandwidth: -25	4.3 dBi 10.8 dBi	Not reported	3.1 to 10.6 UWB
[18]	36 x 48x 6.12 mm <sup>3</sup>	nylon-based substrate	Not reported	Minimum impedance matching of $ S_{11} $ over the bandwidth: -22	7.04 dB	Not reported	8.2 to 13 UWB
[20]	30 x 30 x 0.75 mm <sup>3</sup>	a cloth with 100% cotton	Not reported	Minimum impedance matching of $ S_{11} $ over the bandwidth: -30	Not reported	Not reported	3.0 to 16 UWB
[21]	45 x 35	Denim	3.0 7.0 9.0	-12.0 -18.0 -35.0	2.74 4.17 4.074	Not reported	4.2 to 10.6 (86.48 %) UWB
[22]	86 x 90 x 1.06 mm <sup>3</sup>	Denim	2.1366 4.756 11.49	-22.23 -38.10 -20.79	Not reported	3.3 4.2 5.19	4 to 6, 11 to 12 (87.4 %, 89.6 %)
[23]	30 x 35 x 1.2 mm <sup>3</sup>	Denim	3.82 9.80	-26.41 -15.0	3.45 4.63	3.61 4.86	3.2 to 11.8 (114.6 %) UWB
<b>This Study</b>	35x50x1 mm <sup>3</sup>	Denim	2.44 7.66	-47.64 -42.65	2.23 (dBi) 2.4 (dBi)	4.32 4.87	2.12 to 10.04 UWB

## Acknowledgment

This work was supported by Adana Alparslan Turkes Science and Technology University Research Fund (Project Number: 22119001).

## References

- Dang T, Zhao M. The application of smart fibers and smart textiles. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd; 2021.
- Mikulić D, Šopp E, Bonefačić D, Bartolić J, Šipuš Z. Design and Realization of Wearable Textile Slotted Waveguide Antennas. Sensors [Internet]. 2023 Aug 29;23(17):7509. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7509>
- Lazaro A, Villarino R, Lazaro M, Canellas N, Prieto-Simon B, Girbau D. Recent Advances in Batteryless NFC Sensors for Chemical Sensing and Biosensing. Vol. 13, Biosensors. NLM (Medline); 2023.

4. Potey PM, Tuckley K. Design of wearable textile antenna with various substrate and investigation on fabric selection. In: 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics, ICMAP 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. p. 1–2.
5. Kumar A, Pharwaha APS. Challenges and Issues in the Design of Micro-machined Antennas - A Review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*. 2020 Sep 23;14(1):75–89.
6. Salvado R, Loss C, Gon, Pinho P. Textile materials for the design of wearable antennas: A survey. Vol. 12, *Sensors (Switzerland)*. 2012. p. 15841–57.
7. Loss C, Gonçalves R, Lopes C, Pinho P, Salvado R. Smart coat with a fully-embedded textile antenna for IoT applications. *Sensors (Switzerland)*. 2016 Jun 22;16(6).
8. Gardašević G, Katzis K, Bajić D, Berbakov L. Emerging wireless sensor networks and internet of things technologies—foundations of smart healthcare. *Sensors (Switzerland)*. 2020 Jul 1;20(13):1–30.
9. Paradiso R, Loriga G, Taccini N. A wearable health care system based on knitted integrated sensors. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 2005 Sep;9(3):337–44.
10. Sibinski M, Jakubowska M, Sloma M. Flexible temperature sensors on fibers. *Sensors*. 2010 Sep;10(9):7934–46.
11. Catarinucci L, Colella R, Tarricone L. SMART PROTOTYPING TECHNIQUES FOR UHF RFID TAGS: ELECTROMAGNETIC CHARACTERIZATION AND COMPARISON WITH TRADITIONAL APPROACHES. Vol. 132, *Progress In Electromagnetics Research*. 2012.
12. Wang L. Microwave Imaging and Sensing Techniques for Breast Cancer Detection. Vol. 14, *Micromachines. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*; 2023.
13. Wang L. Early diagnosis of breast cancer. *Sensors (Switzerland)*. 2017;17(7).
14. Wang L, Al-Jumaily AM, Simpkin R. Imaging of 3-D Dielectric Objects Using Far-Field Holographic Microwave Imaging Technique. Vol. 61, *Progress In Electromagnetics Research B*. 2014.
15. Abouelnaga TG, Hamad EKI, Khaleel SA, Beiranvand B. Defining Breast Tumor Location Using a Four-Element Wearable Circular UWB MIMO Antenna Array. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023 Jul 1;13(14).
16. Farooqui MF, Shamim A. Low Cost Inkjet Printed Smart Bandage for Wireless Monitoring of Chronic Wounds. *Sci Rep*. 2016;6:2–3.
17. Kumar R, Singh J, Sohi BS, Chandigarh C, Mohali G. International Journal of Computer Science and Mobile Computing Hexagonal Shaped Body Wearable Textile Antenna on EBG Substrate Material [Internet]. Vol. 5, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2016. Available from: [www.ijcsmc.com](http://www.ijcsmc.com)
18. Mersani A, Osman L, Ribero JM. Flexible UWB AMC Antenna for Early Stage Skin Cancer Identification. Vol. 80. 2019.
19. Abbosh AM. Directive Antenna for Ultrawideband Medical Imaging Systems. *Int J Antennas Propag*. 2008;2008:1–6.
20. Sun Y, Cheung SW, Yuk TI. Design of a textile ultra-wideband antenna with stable performance for body-centric wireless communications. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2014 Dec 1;8(15):1363–75.
21. J.C. Wang EGLMLZWKLMYH. Conformal wearable antennas for WBAN applications. In: in *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. Hong Kong; 2016. p. 1–4.
22. Singh VK, Khan S, Kumar singh V. Textile Antenna Using Jeans Substrate for Wireless Communication Application Microstrip antenna for WLAN and WiMax application View project Energy Harvesting through Rectenna View project Textile Antenna Using Jeans Substrate for Wireless Communication Application [Internet]. 2015. Available from: [www.ijetsr.com](http://www.ijetsr.com)
23. Bhawna Tiwari1 · Sindhu Hak Gupta1 · Vipin Balyan2. Investigation on Performance of Wearable Flexible On-Body Ultra-Wideband Antenna Based on Denim for Wireless Health Monitoring. *J Electron Mater*. 2021;50:6897–909.
24. Eleshop, LiteVNA 64 (eleshop.eu), accessed:25.12.2023.

## A Methodology for Fast and Accurate Analytical Fragility Analysis of Linear Structural Systems during Wind Storms: ALFA

Cihan Çiftci\*<sup>1</sup> 

\*<sup>1</sup> Abdullah Gul University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, KAYSERİ, TURKEY

(Alınış / Received: 09.08.2023, Kabul / Accepted: 27.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords

Fragility Curve,  
Monte-Carlo Simulation,  
Wind Force,  
Structural Reliability,  
Structural Dynamics

**Abstract:** Wind-storms are extremely destructive natural disasters that cause structural damage, and consequently severe personal injuries and casualties. To reduce these injuries and casualties, risk assessment of existing structures and improvement of building design regulations have become important. To assess the risk of structural systems, analytical fragility analysis is a recently developed method by providing conditional failure probabilities for the structural systems. However, the analytical fragility analysis requires extensive computational time and effort which makes it infeasible for large scale structures. This proposed paper develops a new methodology (Analytical Linear Fragility Analysis: ALFA) to simplify and to expedite the analytical fragility analysis for linear structural systems without compromising accuracy. ALFA is exemplified by obtaining the fragility curves of 70 different multi-degree of freedom linear mass-column systems subjected to varying wind loading conditions. The fragility curves of the same mass-column systems were also obtained using Monte-Carlo (MC) based brute-force methodology, which is a commonly used computationally expensive method in literature, and results are compared. This comparison yields the conclusion that ALFA is 240 times faster than the brute-force one, without losing accuracy. Moreover, ALFA can be utilized for improvement of performance-based design specifications and the preliminary risk assessment of nonlinear structural systems.

## Rüzgar Fırtınaları Sırasında Lineer Yapısal Sistemlerin Hızlı ve Doğru Analitik Kırılabilirlik Analizi için Bir Metodoloji: ALFA

### Anahtar Kelimeler

Kırılabilirlik Eğrisi,  
Monte-Carlo Simülasyonu,  
Rüzgar Yüğü,  
Yapısal Güvenilirlik,  
Yapısal Dinamik

**Öz:** Rüzgar fırtınaları, yapısal hasara ve sonuç olarak ciddi kişisel yaralanmalara ve kayıplara neden olan son derece yıkıcı doğal afetlerdir. Bu yaralanma ve can kayıplarını azaltmak için mevcut yapıların risk değerlendirmesi ve bina tasarım yönetmeliklerinin iyileştirilmesi önem kazanmıştır. Yapısal sistemlerin riskini değerlendirmek için, analitik kırılabilirlik analizi, yapısal sistemler için koşullu arıza olasılıkları sağlayarak son zamanlarda geliştirilen bir yöntemdir. Bununla birlikte, analitik kırılabilirlik analizi, büyük ölçekli yapılar için uygulanamaz hale getiren kapsamlı hesaplama zamanı ve çabası gerektirir. Önerilen bu makale, doğruluktan ödün vermeden doğrusal yapısal sistemler için analitik kırılabilirlik analizini basitleştirmek ve hızlandırmak için yeni bir metodoloji (Analitik Lineer Kırılabilirlik Analizi: ALFA) geliştirmektedir. ALFA, değişen rüzgar yükü koşullarına maruz kalan 70 farklı çok serbestlik dereceli lineer kütle kolon sisteminin kırılabilirlik eğrilerinin elde edilmesiyle örneklenmiştir. Literatürde hesaplama açısından pahalı bir yöntem olan Monte-Carlo (MC) tabanlı kaba-kuvvet metodolojisi kullanılarak aynı kütle-kolon sistemlerinin kırılabilirlik eğrileri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, ALFA'nın kesinliği kaybetmeden kaba kuvvetten 240 kat daha hızlı olduğu sonucunu verir. ALFA, performans dayalı tasarımların iyileştirilmesi ve doğrusal olmayan yapısal sistemlerin ön risk değerlendirmesi için kullanılabilir.

\*Corresponding Author, email: cihan.ciftci@agu.edu.tr

## 1. Introduction

Bu Wind-storms (hurricanes, typhoons, and tropical cyclones) can be accepted to be one of the most devastating and costly natural disasters affecting civil infrastructures [1–6], live trees in forest and urban areas [7,8], and consequently human lives. These natural disasters cause significant property damages and personal injuries – even fatally [4,9,10]. For instance, two different tornadoes in 2011, which cut through Tuscaloosa, Alabama and Joplin, Missouri, caused a total of 553 recorded fatalities [11]. Furthermore, wind-induced tree failures cause an average of 31 deaths per year in the United States, according to the records during 1995-2007 [10]. Thus, arborists, structural engineers, insurance industries, and regulatory authorities (e.g., NIST, IBHS, FEMA, ASCE, AISC, and ACI) greatly exert to mitigate these human and socio-economic losses by providing advanced risk assessment of structures and also by improving the current building design specifications and guidelines [1,4,7–9,12]. For the advanced risk assessment of constructions (e.g., [2,13–16]) and live trees (e.g., [8]), analytical fragility analysis is recently adopted tool to construct the fragility curves of the structures.

Analytical fragility analysis, which is introduced in the early 1980s for the risk assessment of nuclear power plants (e.g., [17–19]), is a tool to provide conditional failure probabilities of structural systems. The fragility analysis has been received increasing attention among scientific community studying on performance-based structural engineering since, especially, last two decades [20]. Recently, fragility analysis is a preferable tool used by researchers on wind (e.g., [2,8,13–16,21–23]) or seismic loading (e.g., [20,24–27]) for the risk assessment of structures. In regard to the wind loading, the studies of Ellingwood et al. [22], Lee and Rosowsky [13], van de Lindt and Dao [14], Quilligan et al. [15], Ciftci et al. [8], and Sim and Jung [16] addressed the fragility analysis for light-frame wood failures, roof sheathing failures, wood-frame building failures, steel and concrete wind turbine towers, live-tree failures, and window failures in buildings, respectively.

For the analytical fragility analysis of structures, Monte-Carlo (MC) Simulation is the most commonly used reliable method by researchers to randomly generate sampling data [8,16,28]. Using the MC simulations, the risk assessment of structures can be done by considering the effects of several uncertainties, involved either in the mechanical and physical properties of the structures or in the loading condition exerted on the structures. It is difficult to develop an analytical closed-form formulas or explicit equations for a relationship between these uncertainties and the dynamic response of the structures [24]; thus all these uncertainties can be combined into MC simulations (as a brute-force approach) to represent the combined effects of the uncertainties on the risk assessment of structures and to statistically construct accurate and reliable fragility curves. However, the main disadvantage of the MC simulations is to be greatly computationally expensive [29,30]. Randomly generated sampling data of MC simulations are delivered to an external finite element (FE) based package-program that requires extensive computational time and effort to accurately calculate demand stresses or deformations of the structures using full dynamic time history analyses [31]. In order to reduce these extensive computational time and effort, the analytical fragility analysis traditionally utilizes an empirical method, which is called as two-parameter lognormal distribution function, originally developed in 1980s [31]. This method is based on a statistical relationship between external loading parameters (e.g., wind speed, peak ground acceleration-PGA, and spectrum intensity-SI) and the dynamic response of structures. Thus, the analytical fragility curves of structures are traditionally constructed to be a lognormal cumulative distribution function based on this relation, which can be obtained using a less number of FE based MC simulations [2,13,16,18,26,32–34]. However, this method may have non-negligible errors due to the dispersions in the statistical relationship between external loading parameters and the dynamic response of structures [35]. Also, Jeong and Elnashai presented a new simplification method to reduce the extensive computational time and effort for the construction of fragility curves [31]. In this study, first, these researchers constructed the multi-degree of freedom (MDOF) models of 3 bridges and 2 reinforced-concrete buildings using a FE based package-program. Then, these numerical models are converted from MDOF to representative or equivalent single-degree of freedom (ESDOF) systems. Consequently, the extensive computational time and effort regarding to the time history dynamic analyses for each MC simulation of MDOF systems have been reduced. Then, one can construct the equivalent fragility curves using the ESDOF, instead of the MDOF system of structures. However, the limitation of these conversions may also cause non-negligible errors for the analytical fragility curves [29].

This study presents a new theoretical methodology (ALFA) to reduce the computational time and effort required for an accurate analytical fragility analysis. To the best of the author's knowledge, an accurate analytical fragility analysis utilizing the parameters of dynamic amplification factor and phase angle regarding to the dynamic characteristics of structures has not been employed. In this methodology, these parameters are calculated using relatively less number of harmonic time history analyses. In other words, to satisfy the desired accuracy for the fragility analysis of a structure requires tens of thousands (e.g., 56000 in [8]) or even hundreds of thousands FE based dynamic time history analyses, which is called a MC based brute-force methodology. For the similar accuracy, ALFA requires a comparatively very few number (a total of 100 dynamic harmonic analyses were used

to calculate the dynamic parameters) of dynamic analyses to construct the fragility curves of linear structural systems. Therefore, the required time for ALFA is significantly less than the MC based brute-force methodology. As a case study, the analytical fragility curves of a total of 70 different multi-degree of freedom (MDOF) mass-column systems are constructed using both the MC based brute-force methodology and ALFA with similar accuracies. Therefore, it was shown that the fragility curves of the MDOF mass-column systems have been accurately (0.23 % mean-error with a standard deviation of 0.29 %) obtained with ALFA 240 times faster than the MC based brute-force methodology.

Overall, this new methodology would be beneficial for (i) the design-regulations of structures to build more sustainable, stable, and safer structures, (ii) the decision on whether the existing structures should be retrofitted, and (iii) the preliminary risk assessment of nonlinear structural systems.

## 2. Material and Method

The presented methodology (ALFA) decreases the computational time and effort required for an accurate analytical linear fragility analysis. ALFA is addressed in five main sub-sections; (1) structural modeling, (2) stochastically generation of wind forces, (3) harmonic analysis for generated wind forces, (4) steady-state deformation response, and (5) probability of exceedance for failure estimation. The flowchart in Figure 1 represents these sub-sections to summarize the presented methodology.

### 2.1. Structural Modeling

A general MDOF system, structurally, consists of several matrices regarding to mass, stiffness and damping. As the case studies for this work, first, these matrices are assigned in a Matlab-code to define a total of 70 different MDOF mass-column systems as in Figure 1. The degree of freedom (DOF) of these 70 different MDOF systems varies from 1 to 200 in increments of 2 (for the range between 1 and 100) and in increments of 5 (for the range between 100 and 200). Thus, the size of the matrices (e.g., mass, damping, stiffness) of each mass-column system varies regarding to the number of the DOF. For example, 2DOF and 4DOF systems have two lumped masses and two columns, and four lumped masses and four columns, respectively. After defining the MDOF systems, second, the assumption of Panofsky and Dutton [36] was used in order to define the excitation forces for the MDOF systems. According to this assumption, wind-speed ( $V(z,t)$ ) varies with the ratio of  $z$  (height above ground in [m]) to  $h$  (the reference height=10 m) as in Eq.1. From fluid dynamics, the applicable wind-force ( $F(z,t)$ ) in time domain depends on square of the wind-speed, as follows (see [8]);

$$F(z,t) = \frac{\rho_{\text{air}} A C_d}{2} [V(z,t)]^2, \quad \text{where} \quad V(z,t) = V(t)_h \left[ \frac{z}{h} \right]^{(1/7)} \quad (1)$$

in which  $A$  is frontal area [m<sup>2</sup>],  $\rho_{\text{air}}$  is air density [kg/m<sup>3</sup>],  $C_d$  is non-dimensional drag coefficient, and  $V(t)_h$  is a function of wind-speed [m/s] in terms of time at the reference height of  $h$ , 10 m.

To capture the characteristics of the dynamic response of the MDOF systems, ALFA utilizes the frequency-response parameters (Rd: dynamic amplification factor, and  $\phi$ : phase angle). The frequency-response parameters of each MDOF system could be obtained using a series of harmonic analyses. Thus, a total of 100 harmonic excitation forces of  $F(z,t,w)$ , which is defined in the equation below, is assigned to each lumped-mass of the MDOF systems as in Figure 1.

$$F(z,t,w) = \frac{\rho_{\text{air}} A C_d}{2} \left[ V(t)_h \left( \frac{z}{h} \right)^{(1/7)} \right]^2 \sin(wt), \quad \text{where} \quad w = [0.05, 0.10, 0.15, \dots, 5.00] \quad (2)$$

in which the square term represents the amplitude of the harmonic excitation forces previously addressed in Eq.1. Each frequency ( $w$ ) of these harmonic excitation forces varies from 0.05 [rad/sec] to 5.00 [rad/sec] in increments of 0.05 [rad/sec].

The frequency-response parameters (Rd and  $\phi$ ) are selected as the primary output of this sub-section. Rd (dots in Figure 2) is the ratio of the maximum displacement of the dynamic response of the MDOF systems subjected to harmonic excitations to the maximum displacement of the static response of the MDOF systems. The maximum static displacement,  $(U_{st})_0$  can be computed using the multiplication of the inverse of the stiffness matrix and the excitation force vector ( $(U_{st})_0 = K^{-1}F$ ). The maximum dynamic displacement can be computed using a numerical integration method or finite element methods. For the case studies of this work, Wilson method was selected as the numerical integration method in order to compute the dynamic response of the MDOF systems, and



consequently to compute  $R_d$  and  $\phi$ .  $\phi$  (stars in Figure 2) is the phase angle which defines the time lag in frequency domain between the computed dynamic response and the applied excitation force.

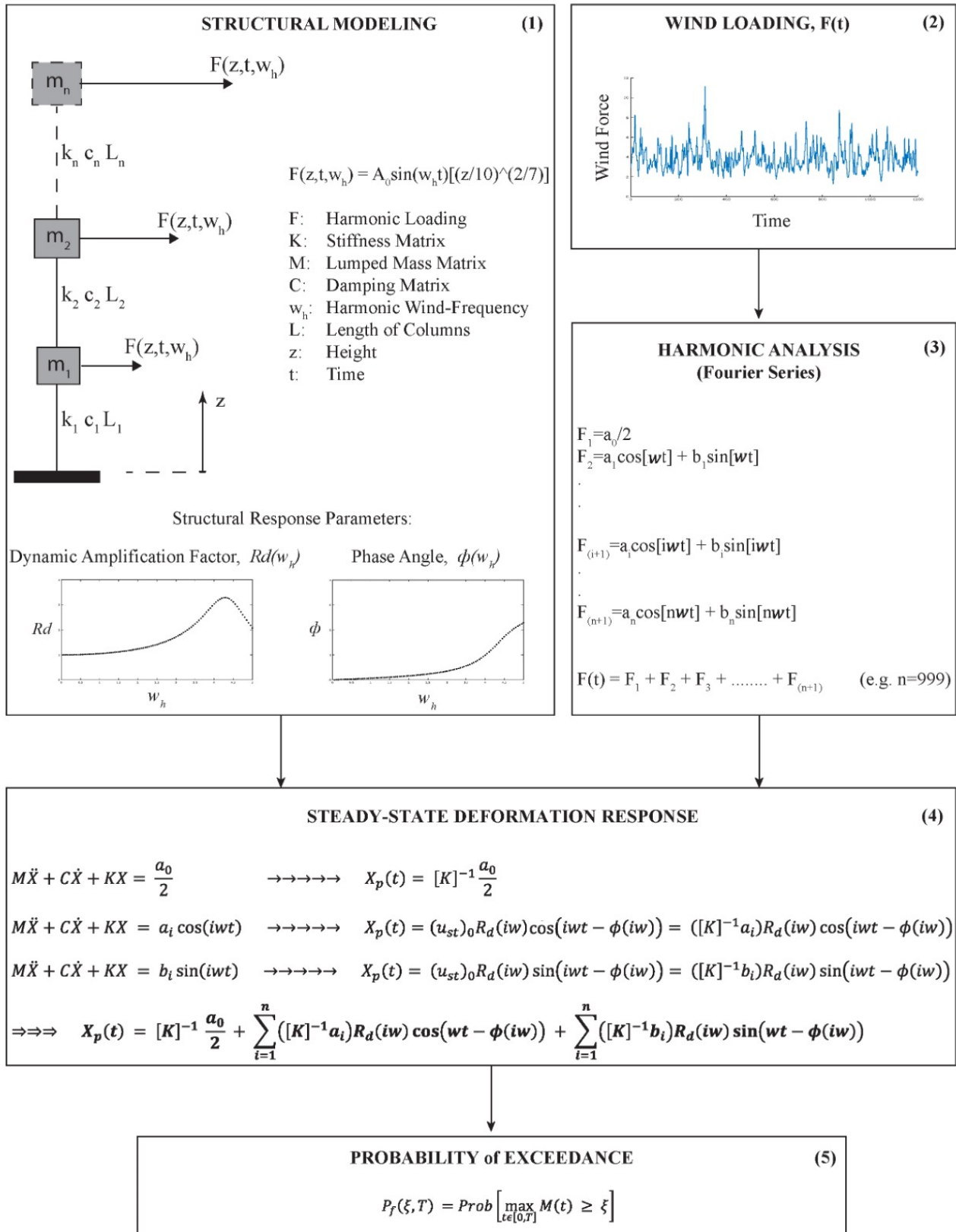
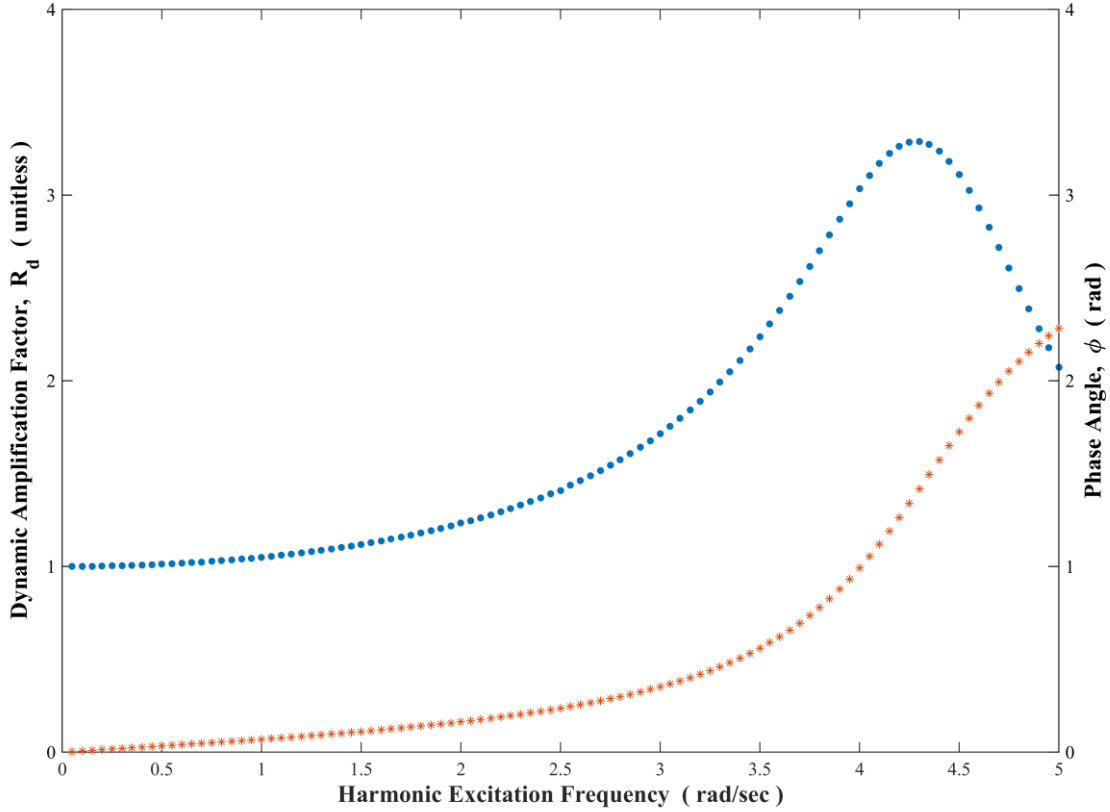


Figure 1. Flowchart for ALFA



**Figure 2.**  $R_d$  (dots) and  $\phi$  (stars) in frequency domain varying from 0.05 rad/sec to 5.00 rad/sec in increments of 0.05 rad/sec for 3-DOF mass-column system

The frequency-response parameters are particularly useful to calculate the dynamic response ( $U_{dyn}$ ) of the MDOF systems subjected to harmonic excitation forces. The equation below can be used for this calculation [37];

$$U_{dyn}(t) = (U_{st})_0 R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

in which  $(U_{st})_0$  is the maximum static response of the MDOF system as addressed above. Additionally, it should be stated that each of the frequency-response parameters ( $R_d$  and  $\phi$ ) is a function of the harmonic excitation frequency,  $\omega$ . The functions of  $R_d$  and  $\phi$  are plotted in Figure 2 for a 3-DOF system, as an example among a total of 70 different case studies.

In reality, the wind excitation forces are not harmonic; they are in irregular forms and stochastic within varying frequencies in time domain. Thus, first, the stochastic wind-force samples will be generated for the excitation forces of 70 different MDOF systems in Section 2.2. Second, the dynamic response of the MDOF systems subjected to the generated wind-samples will be accurately obtained by Section 2.3 and 2.4.

## 2.2. Stochastically Generated Wind-Force Samples

As mentioned previously, the drag force or wind-force ( $F(z, t, w)$ ) depends on wind-speed (Eq. 1). The critical step for the calculation of the drag force is to have realistic wind-speed samples. Therefore, in order to generate a significant number of realistic wind-speed samples, wind-speed generation process, which was presented by the study of Ciftci et al. [8], is used. According to this generation process, it is necessary to have power spectral density (PSD) regarding to wind-speed measurements. For an empirical formula of PSD, Davenport's formula [38] is used as follows;

$$PSD(\omega) = \frac{\frac{916700}{2\pi} c\omega}{\left[1 + \left(\frac{191\omega}{\mu_V}\right)^2\right]^{(4/3)}} \quad (4)$$

where  $c$  is the surface drag coefficient (selected to be 0.005 for this work based on the recommendation in [38] for an open unobstructed country),  $\omega$  is the wind frequency [rad/sec], and  $\mu V$  is the mean of the wind-speed samples. For a targeted mean wind-speed value, randomly distributed Gaussian wind-speed samples ( $V^G$ ) in time domain can be generated using spectral representation method as follows [39];

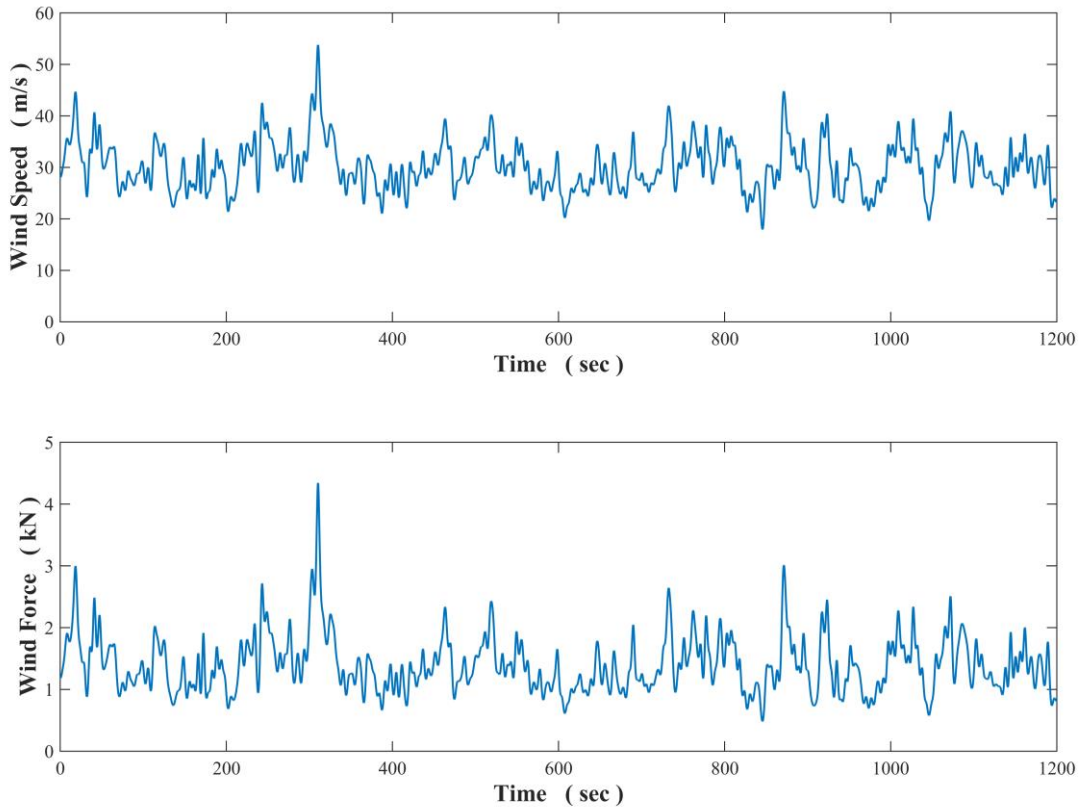
$$V^G(t) = \sum_{r=1}^k A_r \sin(\omega_r t) + B_r \cos(\omega_r t) \tag{5}$$

in which  $A_r$  and  $B_r$  are independent Gaussian random variables with zero mean and variance ( $\sigma_r^2$ ), which can be calculated;

$$\sigma_r^2 = PSD(\omega_r)\Delta\omega \tag{6}$$

where  $PSD(\omega_r)$  is the discrete value of the power spectral density at  $\omega_r$ , and  $\Delta\omega$  is the interval of wind frequencies for equally divided frequency range.

Eqs. 4-6 generate the randomly distributed Gaussian wind-speed samples. Since wind samples are commonly represented by Lognormal or Weibull distributions in the literature, the generated Gaussian samples are converted to the Lognormal distribution using Nataf model [40], as described in the study of Ciftci et al. [8]. By the repetition of the steps of the generation process, a total of 1,000 different wind-speed samples were randomly generated for each mean wind-speed (varying from 20 m/s to 32 m/s in increments of 0.5 m/s). As an example for 3DOF system, one of the generated wind-speed samples can be seen in Figure 3 for the targeted mean wind-speed (30 m/s). Furthermore, using this wind-speed sample and Eq. 1 (e.g., arbitrarily selected values of  $A$ ,  $C_d$  and pair are 3 m<sup>2</sup>, 1.0 and again 1.0, respectively), the wind-force sample was also calculated and shown in Figure 3.



**Figure 3.** One of the generated wind-speed samples for the targeted mean wind-speed, 30 m/s (top); the calculated wind-force sample using the wind-speed sample and Eq. 2 (bottom)

### 2.3. Harmonic Analysis for Generated Wind Forces

Any periodic function can be represented by Fourier series as the summation of an infinite number of sine and cosine terms. The Fourier series representation for the wind-force samples  $[F(t)]$  randomly generated in *Section 2.2* can be written as follows;

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n_f} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad \text{where } \omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (7)$$

where  $a_0$ ,  $a_n$  and  $b_n$  are constant coefficients.  $\omega$  and  $\tau$  are the fundamental frequency and the length of the periodic wind-force samples, respectively. For the case study of this research, upper limit of the summation,  $n_f$ , was arbitrarily selected to be 999 to obtain the desired accuracy, and a total of 24,000 generated wind-force samples with varying frequencies for each targeted mean wind-speed (from 20 m/s to 32 m/s in increments of 0.5 m/s) could be represented by the summation of a total of 47,976,000 ( $24000(1 + 999 + 999)$ ) harmonic wind-forces using the Fourier series representation.

### 2.4. Steady-State Deformation Response

In this study, the generated wind-force samples are the excitation loading for the MDOF systems, and these forces can be expanded within a number of Fourier series as described in *Section 2.3*. According to this expansion (Eq. 7), the equation of motion for the linear MDOF systems can be written as follows,

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(z, t) = \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{999} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \right) \left( \left( \frac{z}{h = 10} \right)^{(2/7)} \right) \quad (8)$$

in which  $h$  is the height above ground, and  $z$  is the location-vector for the lumped masses of the MDOF systems, as previously addressed. Furthermore,  $M$ ,  $C$ , and  $K$ , which have been defined in *Section 2.1*, are the mass, damping, and stiffness matrices of the systems, respectively.  $X$  is the displacement-vector for the MDOF systems,  $\omega$  is the fundamental frequency of the periodic wind-force samples as in Eq. 7, and the other variables have been also defined previously.

Using the principle of superposition and knowing that both  $R_d$  and  $\phi$  are a function of  $n$  times  $\omega$  ( $n\omega = w$  defined in *Section 2.1*), the steady-state solution of the equation of motion (Eq. 8) can be represented as the summation of the steady-state solutions of each equation as follows;

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = (a_n \cos(n\omega t)) \left( \left( \frac{z}{h} \right)^{(2/7)} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{from Eq. 3 } \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= (u_{st})_0 R_d(n\omega) \cos(n\omega t - \phi(n\omega)) \\ \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= ([K]^{-1} a_n) R_d(n\omega) \cos(n\omega t - \phi(n\omega)) \end{aligned}$$

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = (b_n \sin(n\omega t)) \left( \left( \frac{z}{h} \right)^{(2/7)} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{from Eq. 3 } \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= (u_{st})_0 R_d(n\omega) \sin(n\omega t - \phi(n\omega)) \\ \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= ([K]^{-1} a_n) R_d(n\omega) \sin(n\omega t - \phi(n\omega)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M\ddot{X} + C\dot{X} + KX &= \left( \frac{a_0}{2} \right) \left( \left( \frac{z}{h} \right)^{(2/7)} \right) = \left( \frac{a_0}{2} \right) (\cos(n\omega t)) \left( \left( \frac{z}{h} \right)^{(2/7)} \right), & \text{for } n = 0 \\ \text{from Eq. 3 } \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= (u_{st})_0 R_d(n\omega) \cos(n\omega t - \phi(n\omega)), & \text{for } n = 0 \\ \Rightarrow \vec{X}_p(t) &= \left( [K]^{-1} \frac{a_0}{2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Using the principle of superposition for the solutions of Eqs. 9, 10 and 11, the complete steady-state solution of Eq. 8 can be expressed as;

$$\begin{aligned} \vec{X}_p(t) = & \left( [K]^{-1} \frac{a_0}{2} \right) + \sum_{n=1}^{999} ([K]^{-1} a_n) R_d(n\omega) \cos(n\omega t - \phi(n\omega)) \\ & + \sum_{n=1}^{999} ([K]^{-1} b_n) R_d(n\omega) \sin(n\omega t - \phi(n\omega)) \end{aligned} \quad (12)$$

## 2.5. Probability of Exceedance for Failure Estimation

Fragility analysis requires the comparison between the displacement-demand of the lumped-masses of the MDOF mass-column systems and a predefined certain damage state. As the case studies for this work; while the displacement-demand is calculated using Eq. 12, the certain damage state can be defined as the compressive yield stress (due to the wind-induced bending moment) of the column material for the MDOF systems. Thus, the limit state of the fragility analysis is based on the yield moment ( $M_y$ ) of the base column. After defining the limit state (or threshold,  $\xi$ ), the probability of exceedance for the failure estimation (Pf) can be calculated in terms of a given time period of T ([8]);

$$P_f(\xi, T) = \text{Prob} \left[ \max_{t \in [0, T]} M(t) \geq M_y \right] \quad (13)$$

in which  $M(t)$  is the calculated moments in time domain at the base section of the column when the MDOF systems are subjected to randomly generated wind loading.  $M(t)$  is calculated using the complete steady-state solution ( $\vec{X}_p(t)$ ), expressed in Eq. 12, because  $M(t)$  depends on  $\vec{X}_p(t)$  according to the knowledge of the fixed-end-moments in the text-books of structural analysis. As mentioned previously,  $M_y$  is the threshold for the yield moment during a time interval (T). Thus, it can be accepted that the threshold is equal to the yield moment, and it can be expressed as;

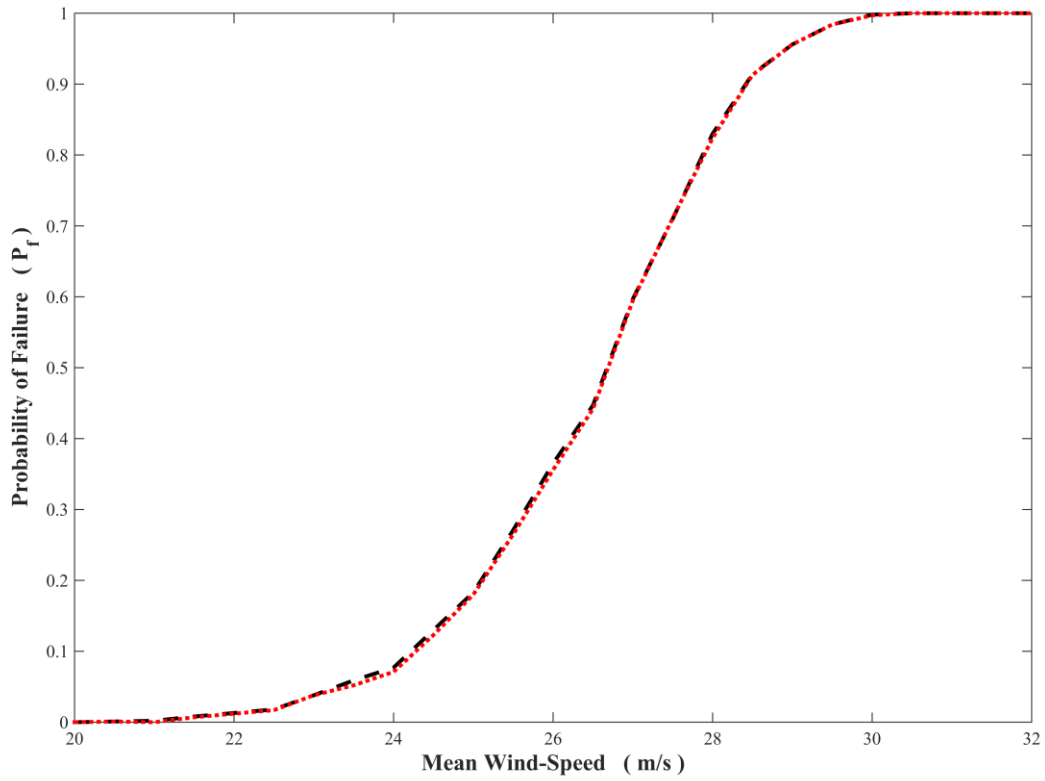
$$M_y = \frac{\pi \sigma_y D^3}{32} \quad (14)$$

where it is assumed that the column has a solid cross-section. As the case studies of this work, the yield stress ( $\sigma_y$ ) and the diameter (D) of the section of the base column were arbitrarily selected to be 28 MPa for a live wood material and 0.5 m, respectively.

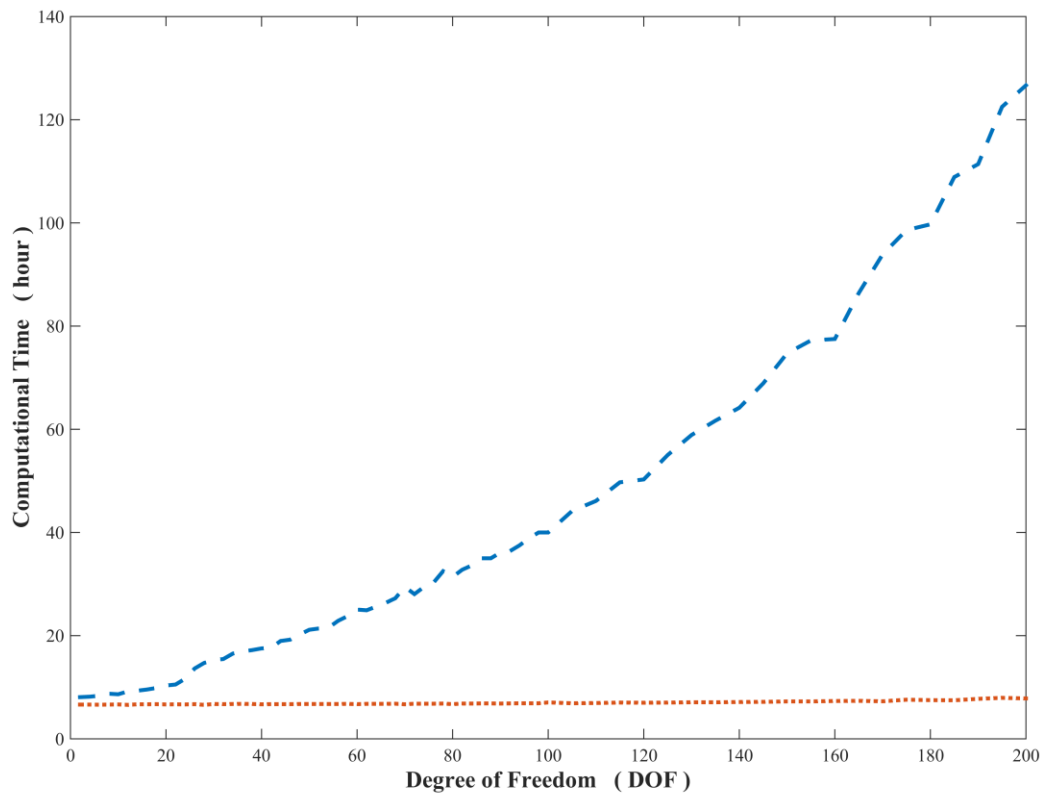
## 3. Results

The main goal of this paper is to present a new, fast, and accurate methodology on constructing analytical fragility curves for linear structural systems. To compare the accuracy and the required computational time of ALFA with the reliable MC based brute force method, the fragility curves of a total of 70 different MDOF systems subjected to a total of 1000 randomly generated wind excitations (regarding to varying wind speeds between 20 m/s to 32 m/s in increments of 0.5 m/s) were computed using both methods. Since the construction of the fragility curve of one MDOF system requires to run a total of 24,000 ( $1,000 \times [32-20] / 0.5$ ) MC simulations for the brute-force method; a total of 1,680,000 ( $24,000 \times 70$ ) MC simulations were run to obtain a total of 70 different fragility curves.

As an example for the case studies in this work, the fragility curves of the 3-DOF system are shown in Figure 4 regarding to the accuracy of ALFA. According to the figure, it is seen that the fragility curves of two different methods are greatly similar. Using the fragility curves of the brute-force method as a base, the maximum of the relative error is 0.90 % throughout the wind-speed axis (from 20 m/sec to 32 m/sec) with a mean of 0.23 % and a standard deviation of 0.29 %. Additionally, when the fragility curves of MDOF systems were separately obtained using the two methods, the required computational times were counted using the Matlab-code, "tic" and "toc" commands. Figure 5 is the plot for the required computational times for two different methodologies versus the number of the degree of freedom (DOF) of structural systems varying from 1 to 200. It can be stated that, according to Figure 5, the difference between the speeds of ALFA and the brute-force method exponentially increases with the number of DOF. Furthermore, it should be noted that all these computational times depend on the speed of CPU and RAM of the authors' computer.



**Figure 4.** The fragility curves of the 3-DOF system using ALFA (dotted line) and MC-based brute-force method (dashed line)



**Figure 5.** The computational time required for ALFA (dotted line) and MC-based brute-force method (dashed line) versus the number of DOF varying from 1 to 200

The required computational time (TALFA) to obtain a fragility curve using ALFA can be also approximately estimated by Eqs. 15-18,

$$T_{ALFA} = T_{sm} + n_{ws}(T_{sgwfs} + T_{hawf} + T_{ssdr}) \quad (15)$$

$$T_{sm} \approx 100(T_{bf}) \quad (16)$$

$$n_{ws}(T_{sgwfs} + T_{hawf} + T_{ssdr}) \approx 0, \quad \text{for a large number of DOF} \quad (17)$$

$$T_{ALFA} \approx T_{sm} \approx 100(T_{bf}), \quad \text{for a large number of DOF} \quad (18)$$

in which  $T_{sm}$ ,  $T_{sgwfs}$ ,  $T_{hawf}$ ,  $T_{ssdr}$  represent the required computational time for the sub-sections (“structural modeling”, “stochastically generated wind-force samples”, “harmonic analysis for generated wind forces”, and “steady-state deformation response”) previously described in Sections 2.1, 2.2, 2.3, and 2.4. The subscripts in Eqs. 15-18 are represented by the initial letters of these sub-sections.  $n_{ws}$  is the number of mean wind-speed for the case studies of this proposed paper ( $n_{ws} = (32-20)/0.5 = 24$  for varying mean wind-speed from 20 m/s to 32 m/s in increments of 0.5 m/s).  $T_{bf}$  is the required computational time of the Wilson method for only one MC simulation. According to Eq. 16, the required computational time for the sub-section (“structural modeling”) of ALFA approximately equal to 100 times  $T_{bf}$ , because Wilson method is also used for ALFA in order to compute the frequency-response parameters ( $R_d$  and  $\phi$ ).  $T_{sgwfs}$ ,  $T_{hawf}$ ,  $T_{ssdr}$  can be accepted negligible, relatively with  $T_{sm}$  (see Eq. 17). Since  $T_{sm}$  is a great value for a large number of DOF, while the other ones ( $T_{sgwfs}$ ,  $T_{hawf}$ ,  $T_{ssdr}$ ) nearly do not depend on the number of DOF. Finally,  $T_{ALFA}$  is approximately equal to 100 times of  $T_{bf}$  (see Eq. 18).

The required computational time ( $T_{bf-m}$ ) to obtain a fragility curve using MC-based brute-force method can be approximately estimated by,

$$T_{bf-m} = n_{ws}n_s T_{bf} \quad (19)$$

in which  $n_s$  (selected as 1,000 for the case studies) is the number of stochastically generated wind-force samples, and  $n_{ws}$  is 24 as previously mentioned. Thus,  $T_{bf-m}$  is approximately equal to 24,000 times  $T_{bf}$ . By assuming that real structures consists of a significant number of structural members, Eq. 18 is compared with Eq. 19 for a large number of the DOF as follows,

$$T_{ALFA} \approx 100 \left( \frac{T_{bf-m}}{n_s n_{ws}} \right) = \left( \frac{T_{bf-m}}{240} \right), \quad \text{when } n_s = 1,000 \ \& \ n_{ws} = 24 \quad (20)$$

From Eq. 20, it can be stated that ALFA is 240 times faster than the other methodology (MC-based brute force) for a large number of DOF. This relationship between  $T_{bf-m}$  and  $T_{ALFA}$  would have been seen in Figure 5, if Figure 5 was plotted for a larger number of DOF than 200.

#### 4. Discussion and Conclusion

This proposed paper presents a new methodology (ALFA) on fast constructing the fragility curves of linear structures with a negligible error. There is a trade-off between the speed and the accuracy of the methodology. If the dynamic amplification factor and phase angle of a structure are obtained using a less number of varying harmonic loading frequency, the speed of ALFA will increase (see Eqs. 16-18). For example, the mean error of the fragility analysis of the 3-DOF mass-column system is 0.23 % (Figure 4), while the number of varying harmonic loading frequency (Eq. 1) is 100 between 0.05 rad/sec and 5.00 rad/sec in increments of 0.05 rad/sec. Thus, the required computational time of ALFA can be decreased using a less number of varying harmonic loading frequency, but the error will increase. Additionally, the error of the fragility analysis also depends on how much the frequency-response parameters ( $R_d$  and  $\phi$ ) can be represented accurately using an optimum range and optimum interval for the harmonic loading frequency in Eq. 1. Thus, a user of ALFA, first, should focus on the smoothness and the reliability of the parameters frequency domain (Figure 2). Furthermore,  $R_d$  and  $\phi$  are plotted in terms of the discretely varying harmonic loading frequencies in increments of 0.05 rad/sec, for the case studies of this work. Then, these plots are assumed to be a continuous function using cubic-interpolation between the discrete values, in order to calculate the  $R_d$  and  $\phi$  in Eq. 12. This interpolation may explain the reason to have an increasing error. The other reason of the error is due to the application of the harmonic analysis on the generated wind-force samples (see Section 2.3). In other words, the harmonic analysis was applied for the case studies of this work using  $n_f = 999$  instead of infinity. If  $n_f$  had been decreased greatly, some non-negligible errors would have occurred.

For a fragility analysis, at least one limit state should be defined. In the literature, for example, the limit states of structures can be separately defined for several performance levels such as immediate occupancy (IO), life safety (LS), and collapse prevention (CP), which are commonly used by civil engineers. The main aim of this paper is to develop a new methodology for fast and accurate fragility analysis of structures, not to compute the fragility curve of a specific structure for a specific performance level. Thus, the performance levels (e.g., IO, LS, and CP) were not used for the case studies of this work. However, it can be stated that ALFA can be applied for MDOF structural systems regarding various performance levels. Additionally, this presented methodology is developed for elastic range of structural materials, not for plastic region. The future investigations about the effects of the geometric and material nonlinearities of structures on ALFA can be also useful, especially, for the nonlinear risk assessment of steel structures.

For the case studies of this work, Wilson method was selected as a numerical integration method to obtain the frequency-response parameters ( $R_d$  and  $\phi$ ), which are addressed in Section 2.1. Whereas Wilson method is one of the commonly used numerical integration methods in vibration analysis; another numerical method (e.g., Newmark method) or a finite element method would have been also selected. The accuracy of the presented methodology depends on the accuracy of the Wilson method used for Section 2.1, "structural modeling". Thus, it is greatly important to accurately model the structures using a reliable numerical or finite element method.

For the loading condition in the case studies of this work, Davenport's formula was selected regarding to the power spectral density (PSD) for Section 2.2. Although Davenport's formula is one of the most commonly used empirical formulas, another empirical formula would have been selected for wind-speed generation, or enough number of real wind-speed measurements would have been used.

It is well known that structures before being constructed are often modeled by engineers using finite element methods (FEMs). So, the frequency-response parameters of these structures, which are required for ALFA, can be rapidly computed using the FE models of the structures instead of using numerical integration methods, such as Wilson method. In other words, several harmonic excitation loads in varying frequencies can be applied using the FE models, and the frequency-response parameters corresponding to critical points of the structures can be obtained. Then, the demand response of the structures subjected to random excitation forces can be rapidly computed by using ALFA, without solving dynamic equations anymore. Furthermore, especially for the special structures which have high importance factor for design, the design regulations may be updated in future. In these design regulations, the fragility analysis may be mandatory for these special structures, (i) to build more reliable structures, (ii) to accurately evaluate the insurance of existing structures, and (iii) to decide whether the structures should undergo retrofitting or which kind of repairing strategies and priorities should be applied.

ALFA was developed in this paper in order to accurately simplify and expedite the analytical fragility analysis for the assessment of linear structural systems subjected to wind loading. The main parts of ALFA are (1) to obtain the frequency-response parameters belonging to the dynamic model of structures, (2) to stochastically generate wind-force samples, (3) to represent these wind-force samples using Fourier series, (4) to estimate the steady-state response of the structural systems, and (5) to compute the probability of exceedance of the systems regarding the yield moment capacities of the structural systems. All these steps of ALFA are put into practice as the case studies of this work. The fragility analysis of a total of 70 different MDOF mass-column systems is computed using ALFA and MC based brute-force method to compare the computational time and effort required for both of the methods. This comparison shows that fragility analysis can be computed 240 times faster using ALFA than the latter method.

In summary, ALFA is a powerful tool to rapidly obtain the fragility curves of linear structural systems with a high accuracy level. These fragility curves can provide additional ideas and reliable information on risk assessment of structural design of new buildings for engineers and also on the insurance evaluation of the existing structures for the decisions of policy makers.

## Acknowledgment

The author of this paper would like to express his appreciation to Dr. Hatice Sinem Sas for her help on proofreading for the draft of the paper.

## References

- [1] J.Y. Lee, B.R. Ellingwood, A decision model for intergenerational life-cycle risk assessment of civil infrastructure exposed to hurricanes under climate change, *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 159 (2017) 100–107. doi:10.1016/j.res.2016.10.022.



- [2] M.O. Amini, J.W. van de Lindt, Quantitative Insight into Rational Tornado Design Wind Speeds for Residential Wood-Frame Structures Using Fragility Approach, *J. Struct. Eng.* 140 (2014) 1–15. doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000914.
- [3] S. Cao, J. Wang, Statistical Summary and Case Studies of Strong Wind Damage in China, *J. Disaster Res.* 8 (2013) 1096–1102.
- [4] K. Lee, D. Rosowsky, Synthetic hurricane wind speed records: development of a database for hazard analyses and risk studies, *Nat. Hazards Rev.* (2007) 1–30. doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8:2(23).
- [5] M.G. Stewart, Cyclone damage and temporal changes to building vulnerability and economic risks for residential construction, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91 (2003) 671–691. doi:10.1016/S0167-6105(02)00462-2.
- [6] J. Shanmugasundaram, S. Arunachalam, S. Gomathinayagam, N. Lakshmanan, P. Harikrishna, Cyclone damage to buildings and structures - a case study, in: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 2000: pp. 369–380. doi:10.1016/S0167-6105(99)00114-2.
- [7] B. Gardiner, P. Berry, B. Moulia, Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage, *Plant Sci.* 245 (2016) 94–118. doi:10.1016/j.plantsci.2016.01.006.
- [8] C. Ciftci, S.R. Arwade, B. Kane, S.F. Brena, Analysis of the probability of failure for open-grown trees during wind storms, *Probabilistic Eng. Mech.* 37 (2014) 41–50. doi:10.1016/j.probenmech.2014.04.002.
- [9] A.C. Khanduri, G.C. Morrow, Vulnerability of buildings to windstorms and insurance loss estimation, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 91 (2003) 455–467. doi:10.1016/S0167-6105(02)00408-7.
- [10] T.W. Schmidlin, Human fatalities from wind-related tree failures in the United States, 1995-2007, *Nat. Hazards.* 50 (2009) 13–25. doi:10.1007/s11069-008-9314-7.
- [11] D.O. Prevatt, J.W. van de Lindt, E.W. Back, A.J. Graettinger, S. Pei, W. Coulbourne, R. Gupta, J. Darryl, A. Duzgun, Making the Case for Improved Structural Design: Tornado Outbreaks of 2011, *Leadersh. Manag. Eng.* 12 (2012) 254–270.
- [12] Y. Tamura, Wind-Induced Damage To Building and Disaster Risk Reduction, in: *17th Asia-Pacific Conf. Wind Eng.*, Taipei, Taiwan, 2009.
- [13] K.H. Lee, D. V. Rosowsky, Fragility assessment for roof sheathing failure in high wind regions, *Eng. Struct.* 27 (2005) 857–868. doi:10.1016/j.engstruct.2004.12.017.
- [14] J.W. van de Lindt, T.N. Dao, Performance-Based Wind Engineering for Wood-Frame Buildings, *J. Struct. Eng.* 135 (2009) 169–177. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:2(169).
- [15] A. Quilligan, A. O'Connor, V. Pakrashi, Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers, *Eng. Struct.* 36 (2012) 270–282. doi:10.1016/j.engstruct.2011.12.013.
- [16] V. Sim, W.Y. Jung, Comparison of Wind Fragility for Window System in the Simplified 10 and 15-Story Building Considering Exposure Category, *World Acad. Sci. Eng. Technol.* 10 (2016) 1627–1641.
- [17] J.R. McDonald, K.C. Mehta, J.E. Minor, Tornado-resistant design of nuclear power-plant structures, *Nucl. Saf.* 15 (1974) 432–439.
- [18] R.P. Kennedy, C.A. Cornell, R.D. Campbell, S. Kaplan, H.F. Perla, PROBABILISTIC SEISMIC SAFETY STUDY OF AN EXISTING NUCLEAR POWER PLANT., *Nucl. Eng. Des.* 59 (1980) 315–338. doi:10.1016/0029-5493(80)90203-4.
- [19] S. Kaplan, H.F. Perla, D.C. Bley, A Methodology for Seismic Risk Analysis of Nuclear Power Plants, *Risk Anal.* 3 (1983) 169–180. doi:10.1111/j.1539-6924.1983.tb00118.x.
- [20] G.C. Marano, R. Greco, M. Mezzina, Stochastic approach for analytical fragility curves, *KSCE J. Civ. Eng.* 12 (2008) 305–312. doi:10.1007/s12205-008-0305-8.
- [21] J.W. Van de Lindt, D. V Rosowsky, Strength-based reliability of wood shearwalls subject to wind load, *J. Struct. Eng.* 131 (2005) 359–363. doi:10.1061/(Asce)0733-9445(2005)131:2(359).

- [22] B.R. Ellingwood, D. V Rosowsky, Y. Li, J.H. Kim, Fragility Assessment of Light-Frame Wood Construction Subjected to Wind and Earthquake Hazards, *J. Struct. Eng.* 130 (2004) 1921–1930. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:12(1921).
- [23] D. V. Rosowsky, B.R. Ellingwood, Performance-Based Engineering of Wood Frame Housing: Fragility Analysis Methodology, *J. Struct. Eng.* 128 (2002) 32–38. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:1(32).
- [24] A. Singhal, A.S. Kiremidjian, Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, *J. Struct. Eng.* 122 (1996) 1459–1467. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:12(1459).
- [25] Y. Pan, A.K. Agrawal, M. Ghosn, Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state, *J. Bridg. Eng.* 12 (2007) 689–699. doi:10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:6(689).
- [26] D. Karmakar, S. Ray-Chaudhuri, M. Shinozuka, Finite element model development, validation and probabilistic seismic performance evaluation of Vincent Thomas suspension bridge, *Struct. Infrastruct. Eng.* 11 (2015) 223–237. doi:10.1080/15732479.2013.863360.
- [27] B. Sun, Y. Zhang, D. Dai, L. Wang, J. Ou, Seismic fragility analysis of a large-scale frame structure with local nonlinearities using an efficient reduced-order Newton-Raphson method, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 164 (2023) 107559.
- [28] W.-S. Yun, H.J. Ham, H.-J. Kim, S. Lee, Evaluation of Extreme Wind Fragility of Balcony Window Systems in Apartments, *J. Archit. Inst. Korea Struct. Constr.* 31 (2015) 3–11.
- [29] M. Rota, A. Penna, C.L. Strobbia, Processing Italian damage data to derive typological fragility curves, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 28 (2008) 933–947. doi:10.1016/j.soildyn.2007.10.010.
- [30] P. Gehl, J. Douglas, D.M. Seyedi, Influence of the Number of Dynamic Analyses on the Accuracy of Structural Response Estimates, *Earthq. Spectra.* 31 (2013) 97–113. doi:10.1193/102912EQS320M.
- [31] S.H. Jeong, A.S. Elnashai, Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities, *Eng. Struct.* 29 (2007) 1238–1251. doi:10.1016/j.engstruct.2006.06.026.
- [32] M. Shinozuka, M.Q. Feng, J. Lee, T. Naganuma, Statistical Analysis of Fragility Curves, *J. Eng. Mech.* 126 (2000) 1224–1231. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1224).
- [33] K.R. Karim, F. Yamazaki, A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 32 (2003) 1603–1626. doi:10.1002/eqe.291.
- [34] D. Straub, A. Der Kiureghian, Improved seismic fragility modeling from empirical data, *Struct. Saf.* 30 (2008) 320–336. doi:10.1016/j.strusafe.2007.05.004.
- [35] M.G. Sfahani, H. Guan, Y.C. Loo, Seismic reliability and risk assessment of structures based on fragility analysis - A review, *Adv. Struct. Eng.* 18 (2015) 1653–1669.
- [36] H.A. Panofsky, J.A. Dutton, *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*, John Wiley and Sons Ltd, New York, 1984.
- [37] A.K. Chopra, *Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson/Prentice Hall, New Jersey, 2007.
- [38] A.G. Davenport, The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 87 (1961) 194–211. doi:10.1002/qj.49708737208.
- [39] M. Shinozuka, G. Deodatis, Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation, *Appl. Mech. Rev.* 44(4) (1991) 191–204. doi:10.1115/1.3119501.
- [40] A. Nataf, Détermination des distributions de probabilités dont les marges sont données, *Comptes Rendus l'Académie Des Sci.* 225 (1962) 42–43.

## A Proposal For Strengthening of RC Structures By Using High Strength Lightweight Concrete Panels and Polyurethane Binders

Hakan KOMAN 

\* <sup>1</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, İSTANBUL

(Alınış / Received: 18.11.2023, Kabul / Accepted: 28.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Keywords;

Polymer binder,  
Abaqus,  
Sap2000,  
Strengthening,  
Concrete Panel

**Abstract:** In that study, the formerly proposed method for seismic retrofitting of RC frames with fiber reinforced lightweight panels and polymer binders were re-tested with full scale frames for the first time in a numerical analysis performed by Abaqus . Later, modelling was performed with beam elements and equivalent compressive strut approach in Sap2000 and a validation of modelling was done. Then ,the method was applied to 3 story and 5 story frames by using beam elements and equivalent compressive strut approach in Sap2000. Retrofitting method increased the lateral load capacity by 2.76 times if compared with traditionally infilled frame according to the analysis done in single story frames. In 3 story frames, the retrofitting with panels increased the lateral load capacity by 3 times and in 5 story frames by 3.18 times if the retrofitted specimens were compared with traditionally infilled structures. Also, the strengthening of infill walls with panels is effective for increasing stiffness of structures.

## Betonarme Yapıların Yüksek Mukavemetli Hafif Beton Paneller ve Poliüretan Bağlayıcılar Kullanılarak Güçlendirilmesi için Bir Öneri

### Anahtar Kelimeler;

Polimer bağlayıcı,  
Abaqus,  
Sap2000,  
Güçlendirme,  
Beton panel

**Özet:** Bu çalışmada, betonarme çerçevelerin fiber takviyeli hafif paneller ve polimer bağlayıcılarla sismik olarak güçlendirilmesi için daha önce önerilen yöntem, Abaqus tarafından gerçekleştirilen sayısal bir analizde ilk kez tam ölçekli çerçevelerle yeniden test edildi. Daha sonra Sap2000'de kiriş elemanları ve eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımıyla modelleme yapılarak modellemenin doğrulanması yapılmıştır. Daha sonra yöntem Sap2000'de kiriş elemanları ve eşdeğer basınç çubuğu yaklaşımı kullanılarak 3 katlı ve 5 katlı çerçevelere uygulanmıştır. Tek katlı çerçevelerde yapılan analize göre güçlendirme yöntemi, geleneksel dolgulu çerçeveye göre yanal yük kapasitesini 2.76 kat artırmıştır. Eğer güçlendirilen çerçeveler geleneksel dolgulu çerçevelerle karşılaştırılsa, 3 katlı çerçevelerde panellerle güçlendirme, yanal yük kapasitesini 3 kat, 5 katlı çerçevelerde ise 3.18 kat artırmıştır. Ayrıca dolgu duvarların panellerle güçlendirilmesi yapıların rijitliğinin artırılmasında etkilidir.

\*İlgili Yazar, email: hakankoman@hotmail.com

### 1. Introduction

Destructive earthquakes caused many casualties around the globe in the past. In the last 30 years, the improvement of performance based methods, the improvements in computational methods, the improvements in construction practice decreased the risk in developed countries whereas the risky building stock of developing countries continued to threaten the human lives. Recent earthquakes in Kahramanmaraş region in 2023 revealed this fact

once again. An earthquake with a magnitude of 7.8 happened in Pazarcik, Kahramanmaraş. Just after 9 hours, an earthquake with a magnitude of 7.5 happened around 100km away in Elbistan, Kahramanmaraş. This means the damaged buildings due to the first strong ground motion were forced to consume energy again due to the second ground motion. One can argue the approach followed in seismic codes because it's based on the ductility of RC structures and the existence of two powerful earthquakes in a short period demands high deformation from structures.

Unfortunately, Kahramanmaraş earthquakes will not be the last strong earthquakes. In a previous study, the probability of an earthquake with a magnitude of 7.0 or higher in the sea of Marmara between 2000 and 2030 was given as 62% ( $\pm 15$ ) [1]. More recent studies agreed with this expectation. In one study, it's said that the possibility of breaking in the Marmara fault in a single earthquake can not be disregarded [2]. These facts indicate that a strong earthquake can soon cause catastrophic damage in Istanbul.

Practical and feasible seismic retrofit methods are needed to strengthen risky building stock and/or to improve the performance of relatively new buildings which were constructed according to the codes. One of most practical method for strengthening of existing buildings is the application of CFRP wrapping of columns and beams or application of CFRP for strengthening infill walls. For instance in a past numerical and experimental study, it's concluded that retrofitting the frame's and infill wall with CFRP material increased the load capacity of RC frames by a factor of 2 to 3 [3]. In a separate research study [4], a proposal was made to retrofit infill walls within reinforced concrete (RC) frames using CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) strips. In this context, a model to define the ductility, stiffness and load capacity of frame was developed for the retrofitted frames. The model's validity was confirmed through experimental verification, utilizing data from two independent studies. Subsequently, this model was employed to analyze a 3-story RC structure constructed in the 1970s [4]. The analysis concluded that, based on the pushover results, retrofitting infill walls with CFRP, significantly enhanced the structure's stiffness and strength, eliminating the need for additional retrofitting methods [4].

But the cost of CFRP material and neediness of careful application generally restricts its widely usage in construction practice in Türkiye. Still the traditional strengthening approach in practice is based on increasing the lateral rigidity of structures by adding RC shear walls. In 1985, after Vina Del Mar earthquake which is happened in Chile with a moment magnitude of 7.5, observations showed that the usage of RC shear walls in design of RC structures prevented a big catastrophe [5]. However adding shear walls to the structures requires labor and time. During the construction of new shear walls, residents often loses their access to the building. This fact restricts the application of method widely especially in residential buildings.

Previously, a method was proposed to strengthen existing infill walls by using precast concrete panels [6]. The method aimed to disturb residents not more than a simple painting process inside the building. Later that idea was improved by using high strength fiber reinforced lightweight concrete panels and polyurethane binders between panels and walls in a numerical study. Application of high strength lightweight panels does not require sophisticated workmanship. Also their specific weight is  $1966\text{kg/m}^3$  which is 18% lighter than conventional concrete. The numerical study was performed by using scaled RC frames and it's seen that using polyurethane binders prevents the detachment of panels from the wall and the method increases the lateral load carrying capacity by 2 to 4.5 times if frames with hollow brick infills are thought as reference specimens [7]. Using polyurethane binder prevented the detachment of panels from wall even in 6% lateral drifts [7]. Polyurethane binders were first proposed in a previous study for [8] the purpose of masonry strengthening with and without CFRP and it was concluded that the deformation capabilities of rubber like material reduces the stress concentrations and provides ductility to masonry. In a recent study [9], the material was used between mortarless wall and RC frame members and the results showed that using polymer binder decreased the initial stiffness of frame and the stresses in the mortarless wall decreased.

In this study, the previously suggested idea was re-tested in numerical analysis performed in Abaqus [10] (to gain knowledge) and model it with simpler finite elements in Sap2000 [11] softwares. For that purpose, a full scale RC frame from a previous experimental and numerical study was chosen [12]. First, full scale RC frames were subjected to a quasi-static lateral loading in Abaqus and the behavior was understood. Later the numerical analysis was extended by using beam elements in Sap 2000 software. In Sap 2000 software the infill walls were modelled by using imaginary compressive struts which have pinned ends. The results were compared with the detailed finite element analysis performed in Abaqus and validation of compressive strut approach was done. Later, multistory frames were modelled and capacity curves were obtained. The results show that the proposed method is promising to strengthen risky building stock and/or to improve the performance of relatively new buildings which were constructed according to the codes.

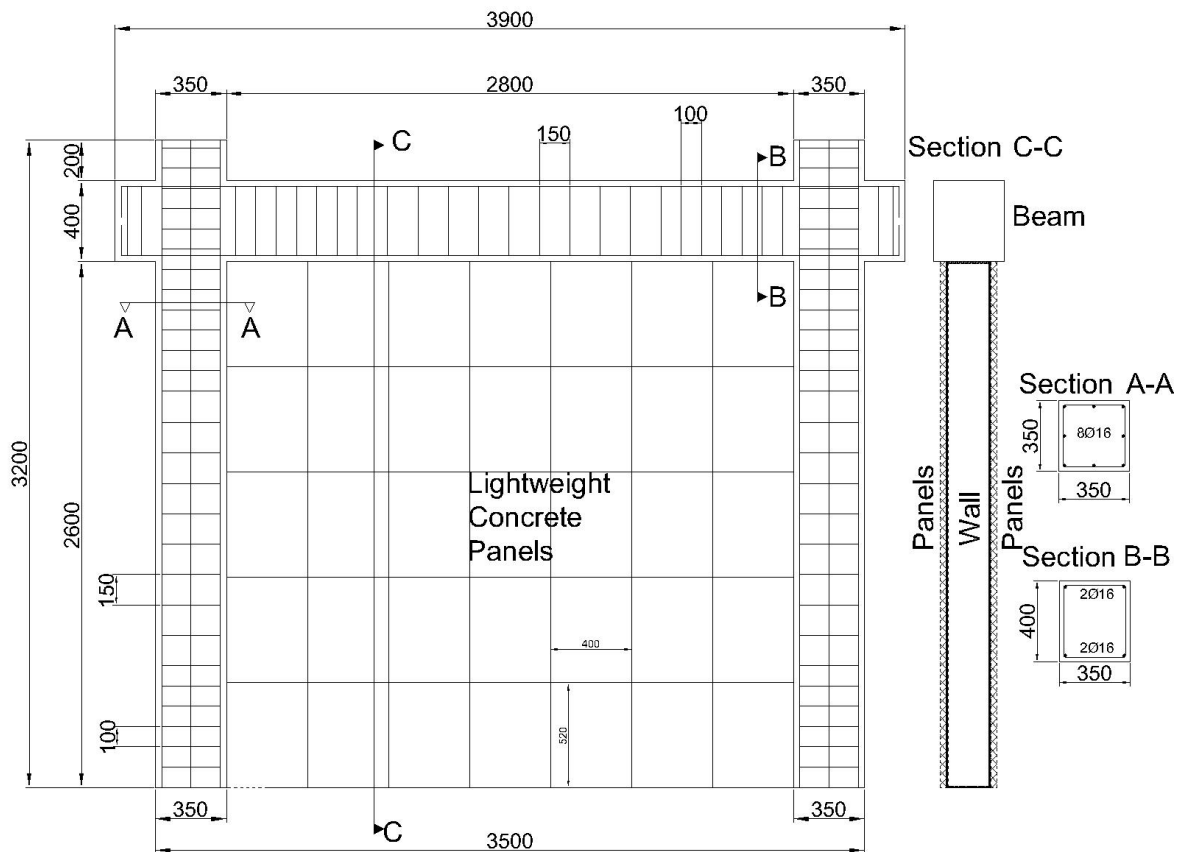
## 2. Materials and Method

The dimensions of the frame were derived from a past study in which both experimental and numerical analyses were conducted using Abaqus [12]. This allows for a comparison of the results presented here with those obtained from previous experimental and numerical data. That comparison was performed in a separate study where metallic elements were proposed between frame and panel [13]. However, it's important to note that the steel and concrete materials were replaced with local equivalents, the differences in material strength fell within an acceptable range. In the previous study, the compressive strength of the concrete in Abaqus was 27.74MPa, whereas here it's considered to be 30MPa (cubic strength). Full-scale single-story RC frames were employed for the analysis [13].

For the steel used in the previous experimental and numerical analyses [12], the material's yield and tensile strengths were 472MPa and 656MPa, respectively. In this study, the values for yielding and tensile strength were 491MPa and 553MPa, respectively, for longitudinal rebars. In terms of confinement rebars, the previous study utilized steel with a yielding strength of 308MPa, whereas in this study, the yielding strength was 277MPa, as previously explained.

The column height was set at 2600mm, measured to the bottom of the beam, and the bay length was 2800mm. The assumed column cross-section was 350mm x 350mm, while the beam cross-section was 350mm x 400mm. The longitudinal rebars for columns were assumed to be 8 $\phi$ 16, and for beams, 4 $\phi$ 16. Confinement rebars for both beams and columns were of size  $\phi$ 8/100/150mm.

In the numerical analysis, the base of each column was considered as a fixed support, eliminating the need to separately model a foundation beam. A vertical load of 700kN (5.71 MPa applied to the column surface) was imposed on the columns. Subsequently, a second specimen was prepared with a wall panel and metallic elements inside the frame. Figure 1 displays the properties and rebar details of the RC frames obtained from the previous study[12] and the proposed retrofitting method . All measurements are presented in millimeters and Figure 1 also illustrates the proposed strenghtening system with panels. The panels which have interaction with frame elements were assumed to be anchored to the frame elements. The situation whether they are anchored or not changes the behavior as indicated in the previous study [7]. Between panels and wall polymer binder is sued rather than epoxy. Because as indicated in the previous study [7], polymer binder allows a ductile behavior after 3% lateral drift and even in 6% lateral drifts no detachment between wall and panels happen. However in epoxy situation detachment happens and frame shows a brittle behavior after 3% lateral drift.



**Figure 1.** The properties of frame taken from past study [12] and proposed retrofitting method

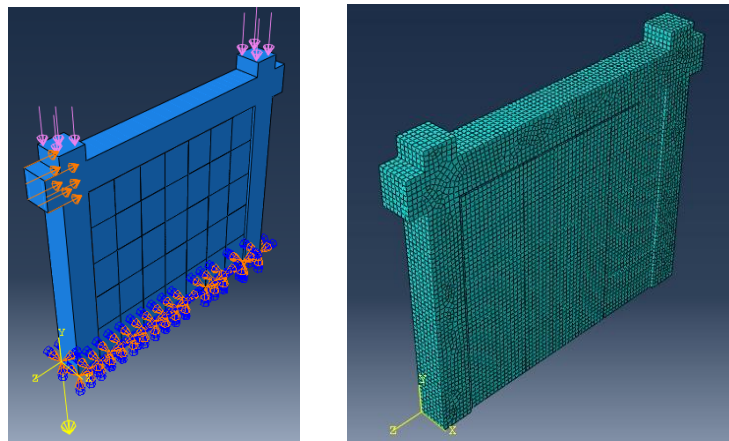
## 2.1. Abaqus modelling

The frame was modelled in Abaqus software and Sap2000 software separately. In Abaqus software C3D8R elements were implemented for all kinds of solid elements except rebars. For the rebars of RC frame, the modelling was done by using “wire” element in the software. A two noded linear beam element called B31 was used in Abaqus to model rebars. All of the rebars were embedded inside the concrete frame in the software to define adherence between rebars and concrete. That way the frame was considered as a reinforced concrete cross section. The frame was pushed up to 0.026 lateral drift ratio in the past study [13] and load displacement curve was compared with the previous experimental and numerical study [12]. A good agreement was found. In this study, bare frame results were used again. Also a frame with a traditional infill wall is prepared. Traditional hollow clay bricks were used for the construction of wall. Thirdly, another frame was prepared in Abaqus by applying the proposed retrofitting method with high strength lightweight fiber reinforced panels.

Abaqus employs the finite element method to initially establish system stiffness, mass, and damping matrices. In the numerical solution of the equation of motion within explicit analysis, Abaqus utilizes the central difference method. In this method, stiffness, mass, and damping matrices are not needed to be rebuilt at each step, and displacements at the I+1 step are determined based on displacements at the I and I-1 steps [14]. In explicit dynamic analysis with Abaqus, computational costs are generally low. A substantial portion of computational power is dedicated to calculating the internal forces of elements.

When performing quasi-static analysis using explicit dynamic analysis in Abaqus, certain conditions must be met because a static problem is transformed into a dynamic one. To consider the problem as quasi-static, inertial forces need to be maintained at a certain level. The control of the kinetic energy's ratio to the total internal energy of the deforming material is essential after the analysis. If this ratio is less than 0.10, the analysis can be regarded as quasi-static [14]. The finite elements (mesh) of the systems can be seen in Figure 2. 50mm elements were used to model frame, mortar and panels and 100mm elements were used to model traditional infill wall and polymer layer between wall and panels.

The column bases were assumed to be fixed support in bare frame analysis and in frame analysis with walls, wall bases were assumed to be fixed support also. The loading conditions can be seen in Figure 2.

**Figure 2. a.** The loading conditions of strengthened frame **b.** The mesh of frame with proposed retrofitting method

### 2.1.1 Modelling the concrete of frame in abaqus

In the field of literature, various theories and models have been proposed to predict the plastic behavior of materials when subjected to multidirectional stresses. These stresses can be conceptualized as a combination of a hydrostatic component and a deviatoric component. The different theories consider either the hydrostatic part, the deviatoric part, or both of them to forecast material behavior. Von Mises theory asserts that the hydrostatic component of stress can be disregarded, assuming that only the deviatoric component is responsible for plastic deformation. In contrast to Von Mises theory, the Drucker-Prager theory takes into account the influence of both the hydrostatic and deviatoric components of stress. Within the Abaqus software, the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model is available for concrete modeling, and it is a modification of the Drucker-Prager model. As depicted

in Figure 3 [15], the K coefficient determines the modification. In the CDP model, the K coefficient is assumed to be 2/3, whereas in the Drucker-Prager model, it is assumed to be 1.

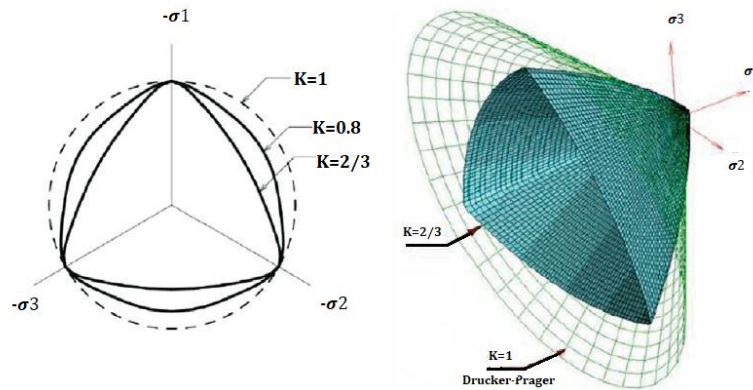


Figure 3. Demonstration of CDP model yielding surface [15]

Abaqus uses the method shown in Figure 4 [16] to establish the compressive stress and its corresponding strain for concrete. Figure 4 indicates the  $d_c$  coefficient to consider the impact of changes in the plasticity of concrete under compression. Abaqus relies on the relationship between plastic strain and corresponding stress values for this purpose.

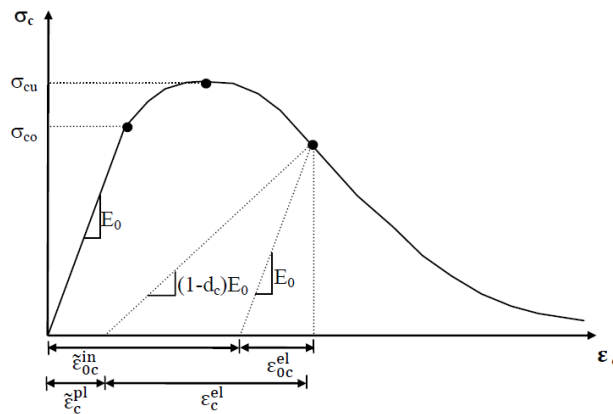


Figure 4. Stress-strain relationships of concrete [16]

The stress -strain values must be determined to follow the method expressed in Figure 4 in Abaqus. The strain corresponding to the maximum stress was assumed as 0.0022( $\epsilon_0$ ) for C25 concrete class and the modulus of elasticity was assumed as 31000MPa. The cubical strength of C25 concrete ( $f_0$ ) was taken as 30MPa. In Abaqus cubical strength value must be implemented in the software. A previous study [17] contains the following formulation to determine the values in the stress-strain graph of concrete.

$$\frac{f}{f_0} = 2.1 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - 1.33 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 + 0.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^3 \quad (1)$$

The tensile strength of concrete is calculated as 0.7 times the square root of  $f_{ck}$  (characteristic strength of concrete). When examining the stress-strain behavior in a tension situation, it was considered to be linear until reaching the material's strength. Beyond that point, an exponential decrease was incorporated into the stress-strain curve. Plastic deformation values were employed and the parameter " $d_c$ ," which signifies the effects that diminish the elasticity of concrete in tension, was set to zero. For the CDP model in Abaqus, additional parameters were necessary. The assumptions for the dilation angle (representing the expansion angle in the p-q plane), eccentricity (the ratio of tensile strength to compressive strength of concrete), and  $f_{bo}/f_{co}$  ratio (the ratio of compressive strengths of concrete under two-directional and unidirectional loading) were 38 degrees, 0.1, and 1.16, respectively. These parameter choices were based on a prior experimental and numerical study, in which numerical simulations yielded results that closely approximated experimental findings [16].

### 2.1.2 Modelling the rebars of frame in abaqus

There are two kinds of steel material for longitudinal and confinement rebars in this study. The materials which had been used in the previous study [7] were used again. The steel used for longitudinal rebars was characterized by a yield strength of 491 MPa and a tensile strength of 553 MPa, and it was commercially known as B420C. For

the stirr-ups, a steel with a yield strength of 277 MPa and a tensile strength of 387 MPa was used, and it was labeled as SAE steel. The steel's behavior was assumed to be consistent in both tension and compression. In Abaqus, stress-strain values must be implemented. In a previous study [16] steel's stress-strain curve was accepted as elastic-perfectly plastic for Abaqus analysis and the results were in good agreement with experiments. As indicated before "wire" elements were used for modelling. Using wire elements is not the only way to model rebars in Abaqus. As an alternative approach truss element or solid elements could be used however as indicated in a previous study [17] wire elements allows analyzing the structure when subjected to higher loads than the situation with solid elements. That's why wire element approach was chosen. In a study [18] where RC frames were analyzed experimentally and numerically, steel's stress-strain curve was accepted as linear plastic hardening, and the results gave good agreement with experiments. In this study, steel's stress-strain curve was considered by using the approach of previous study [7]

### 2.1.3 Modelling the high strength lightweight fiber reinforced concrete

The panels used for strengthening the infill wall were considered to be produced with a high-strength, steel fiber-reinforced lightweight concrete which had been developed based on prior experimental research using expanded clay aggregates [19]. Expanded clay aggregates has a porous surface, thus, cement paste penetrates into the aggregate resulting a mechanical interlocking in the bond zone. This eliminates the weakness of coarse aggregate cement paste transition zone. A few different mixtures were used in the previous study. 510kg/m<sup>3</sup> cement amount, 0.28 water/binder ratio, 2 percent steel fiber ratio, 50kg/m<sup>3</sup> silica fume was used in the production of high strength lightweight concrete with a compressive strength of 85.4 MPa (cubical). The concrete's density was obtained as 1966kg/m<sup>3</sup>, its elasticity modulus was determined as 28000 MPa, and its Poisson's ratio was determined as 0.16 [19].

The parameters for the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model were assumed to be the same as for ordinary concrete. These parameters included the dilation angle, eccentricity, and the  $f_{bo}/f_{co}$  ratio, which were set at 38 degrees, 0.1, and 1.16, respectively. To describe the stress-strain relationships of the concrete, the Hognestad model was used.

As previously mentioned, Abaqus necessitates the inclusion of plastic strains in the CDP model. Figure 5 illustrates the stress-strain graph for fiber reinforced lightweight concrete.

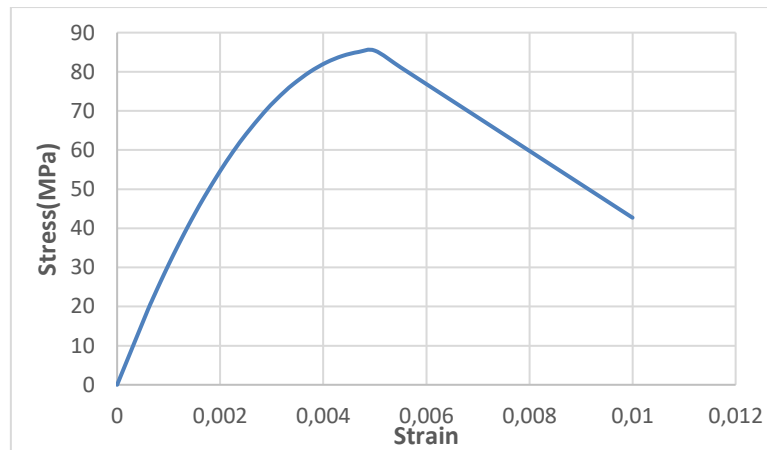


Figure 5. Stress-strain relationships of high strength lightweight concrete determined by Hognestad model [7]

In a study, an idealized and conceptual tensile stress-crack width (stress-strain) relationship curve of ultra-high performance fiber-reinforced concrete in a direct tension test was given [20]. After maximum load, the behavior was determined as an exponentially decreasing curve. The same method was followed for defining stress-strain relationships of concrete in tension here.

### 2.1.4 Modelling the polymer material between panels and infill wall

The polymer binder considered in the study is a polyurethane injection material produced by Sika company. It's a two component material. When applied, the two components were mixed, quickly the product hardens and became like a rubber material. That is why, here, rubber material modelling was considered to model the behavior. Rubber and rubber-like materials exhibit stress-strain curves that differ from those of metals. These curves include an ascending branch after some initial yielding. When modeling hyperelastic materials, stress-strain relationships are derived from the strain energy function, which quantifies the energy stored as the material deforms. Various



models proposed in the literature define hyperelastic behavior by utilizing this strain energy. In a past study, where the material was used between CFRP and masonry bricks, Mooney-Rivlin theory was applied to model the hyperelastic behavior [21]. In that study the same material used in the previous study [7] was used again so  $C_{10}$  and  $C_{01}$  coefficients needed in Mooney-Rivlin Theory was considered as -0.05 and  $C_{10}$ , as 0.47. The more detailed explanation can be found in the mentioned studies [7,21].

### 2.1.5 Modelling the interaction between binders and materials

The interaction between rubber like binder and materials can be defined in Abaqus in two ways. One of the approach is considering cohesive elements to model the binder. Another way is considering that the interaction between binders and materials has a surface-based cohesive behavior. This method allows for the modeling of connections with extremely thin interface thickness, employing the traction-separation constitutive model. Traction-separation laws are employed to define the behavior of joints in tension and shear failure modes. When the assembly is initially loaded, the joint exhibits linear elastic behavior. After reaching the peak traction value, the joint starts to have a plastic response.

There are some criterion to define the initiation of damage. Maximum nominal stress criterion was chosen in Abaqus. This criterion indicates that if the stress in tensile mode, or in shear mode of failure is equal to the strength of joint, damage starts. To characterize the behavior after joint failure, fracture energy of joint must be determined. The fracture energies of the joints were determined based on experimental results. In a preceding investigation [22], experiments involving masonry bricks were conducted to ascertain fracture energies in various failure modes. In a separate study using the results of experimental work [22] for joints containing mortar binder, the fracture energy was determined as 0.10 N/mm for mode 1 tension failure) and 0.183 N/mm for mode 2 shear failure [7]. In contrast, flexible joints constructed with a polymer binder exhibited fracture energies of 4.22 N/mm for mode 1 failure (tension) and 10.93 N/mm for mode 2 failure (shear) [23]. These values were employed in the numerical analysis. To address mixed-mode failure scenarios, the Benzeggagh-Kenane rule was implemented in Abaqus, guided by previous research [23] suggesting its effectiveness when critical fracture energies for second and third mode shear failures are identical. Additionally, an exponent of 2 for the Benzeggagh-Kenane rule was chosen in line with recommendations from the same study, specifically for brittle behavior. Following joint failure, a Mohr-Coulomb shear sliding model was established, incorporating a friction coefficient of 0.66. For a more detailed explanation, refer to the earlier study [7].

### 2.1.6 Modelling the hollow clay brick infill wall and mortar

Macro modelling approach was used to model the infill wall. For that purpose, the same wall modelling in the previous study [7] was used. In the macro modeling approach, the compressive and tensile strengths of the infill wall were determined in this study by using the following formulas based on Eurocodes as follows [7]:

$$f_{ck} = 0.4 \times 3.56^{0.75} \times 5^{0.25} = 1.57 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$f_{ctk} = 0.4 \times 0.9^{0.75} \times 0.257^{0.25} = 0.26 \text{ MPa} \quad (3)$$

Here,  $f_{ck}$  indicates the characteristic compressive strength, 3.56 MPa is the strength of hollow brick and 5 MPa indicates the strength of mortar in compression.  $f_{ctk}$  indicates the tensile strength, 0.9MPa indicates the tensile strength of hollow brick, 0.257MPa indicates tensile strength of mortar [7]. The modulus of elasticity of hollow brick was 1111.49 MPa and the homogenised wall's modulus of elasticity was 1012MPa [7].

The mortar used for constructing the wall was a mixture of cement, lime, and sand in a ratio of 1:2:9. In Abaqus, the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model was employed to simulate the behavior of the mortar. In contrast to concrete modeling, the dilation angle for the mortar was determined to be 36.4 degrees. Experimentally, the mortar's compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio, and tensile strength were found to be 5MPa, 700MPa, 0.157, and 0.257MPa, respectively [7].

## 2.2. Sap2000 modelling

Sap2000 software is also based on finite element method. RC frame was considered to be constructed by using beam elements in the software. By using beam elements, frame can be analyzed in a linear analysis. However a nonlinear pushover analysis was needed to model the frame's behavior in large lateral drifts. Pushover analysis is a nonlinear-static loading procedure in which an incremental lateral displacement loading is applied. That way it's possible to know the lateral capacity curve of the structure. After some amount of increments of loading, frame loses its linear-elastic behavior and starts to yield. But it's widely known that most of the nonlinear behavior

happens in column-beam ends in the RC structures and in other regions of beams and columns, deformations still stay in linear elastic range. That's why rather than modelling the whole frame's elements nonlinearly, defining plastic hinges in column-beam end zones reduces the cost of computation. To model the plastic hinge, the moment curvature or moment-rotation graph of RC elements' cross-sections must be determined. Of course due to the existence of axial forces, moment capacity of column cross section will be dependent on axial force level. The axial force-moment interaction diagram of column must be taken into account also. If it's thought that second order effects do change the behavior, P-delta effects must be taken into account in the software.

In Sap2000 software, to model the plastic hinges, using lumped plastic hinges is one way, but in that study, fiber plastic hinge modelling is chosen. In fiber modelling approach, first the RC cross section is divided into fiber elements. Later by integrating the behavior of every fiber element, the moment carrying capacity and moment curvature relationship is determined. Then the curvature can be divided by the length of plastic hinge and rotation values can be found if it's needed. In that study, the element cross section was divided by 15x15 grids to form fiber elements. In the cross-section, the stress-strain relationships of concrete must be different in the confined region because the lateral pressure due to the existence of stir-ups (confinement rebars) changes the behavior of concrete. For that purpose, Mander model which is available in Sap2000 was used. Mander model can be seen in Figure 6 [24].

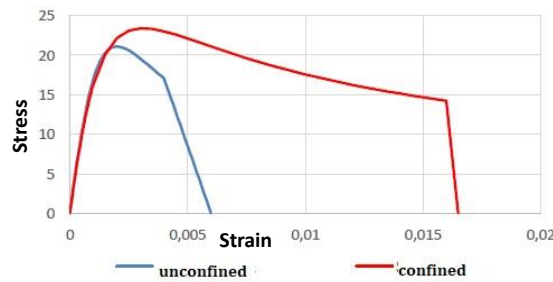


Figure 6. Mander model for defining stress-strain relations of concrete [24]

In Figure 6 [24], by the increase of displacement between confinement rebars, the model approaches to unconfined one. In this study, the distance between confinement rebars in plastic hinge regions were 100mm. In fiber modelling, for the concrete outside of confinements is assumed as unconfined concrete. The rebars are modelled by considering the strain hardening of steel as explained in section 2.1.2. For beam cross-section the plastic moment capacity was calculated as 76.85kNm. For column, 3D column interaction surface is obtained by the software. In the 3D curve, for any angle, Force-moment values can be seen. For instance for P-M3 surface of curve the following values in Table 1 are obtained.

Table 1. Interaction surface of column (P-M3)

Ax. Force KN	Moment(KNm)
-3806	0
-2490	129.47
-2168	150.2437
-1817	164.59
-1431	173.47
-996.43	179.18
-674.92	163.27
-306.27	140.35
-5.83	108.53
458.42	49.37
789.52	0

At the ends of members P-M2-M3 plastic hinges which had been derived from fiber modelling of cross section were assigned. To determine the place where plastic hinges were formed, the points calculated by 0.9 of member length and 0.1 of member length are used. Hinge length was assumed as 0.1 of the member length.

The frames which contains traditional infill wall and infill wall with strengthened panels were modelled by using equivalent compressive strut approach. In literature, many formulas were proposed to model the compressive strut. Some of the proposed formulas were the foundation of methods in seismic codes. In Eurocode 8 [25] for irregularity analysis it's said infills must exist in modelling and it's said that infill walls must be taken into account if they contribute to the lateral rigidity of structures however modelling approach is not explained in details. But in FEMA-356 [26] it's said that effect of infill walls must be taken into account with a FEM (finite element method)

analysis or it must be modelled by using equivalent strut approach and the formulation is given. The formulation in FEMA-356 is based on the study of Mainstone [27]. But the method in FEMA-356 does not consider the level of vertical load. Also, in TSC 2018 [28], for the walls which are strengthened by using a special kind of reinforced mortar, equivalent strut approach is proposed. However, again the level of vertical loading is not taken into account. For this reason in a past study [29] a method considering the vertical load level was proposed. In the proposed method, the initial rigidity of actual system is considered to be equal to the system with equivalent strut by using the following formulation [29]:

$$D_i = \frac{k_d \cos^2 \theta}{1 + \frac{k_d}{k_c} + \sin^2 \theta + 0.25 \frac{k_d}{k_b} \cos^2 \theta} + 24 \frac{E_f I_c}{h'^3} (1 - 1.5(3 \frac{l_b}{l_c} \frac{h'}{l'} + 2)^{-1}) \quad (4)$$

Here,  $D_i$  represents the initial rigidity, while  $k_d, k_c, k_b$  denote the axial stiffness of the diagonal, column, and beam respectively. The variables  $h'$  and  $l'$  refer to the height and length of frame considering the midpoints of columns and beams in the calculations. The  $\theta$  angle is the angle of compressive strut inside the frame. Also  $k_d, k_c, k_b$  can be considered by following the approach outlined in the equation 5 [29]:

$$k_d = \frac{E_d t w}{d}, k_c = \frac{E_f A_c}{h'}, k_b = \frac{E_f A_b}{l'} \quad (5)$$

In equation 5,  $E_f$  represents the frame's modulus of elasticity,  $A_c$  is the cross-sectional area of the column, and  $A_b$  denotes the cross-sectional area of the beam,  $t$  indicates the thickness of infill wall and  $w$  indicates the width of infill wall. In a previous study [30] where equivalent struts were modelled inside RC frame, the width of equivalent struts were calculated by using different formulations proposed in literature and codes and it was seen that, by using the proposed approach explained in equations 4-5, the width of equivalent strut was determined 1.64 times of the width determined by Eurocode 8 approach and 2.23 times of the width determined by Mainstone's approach. In the same study [30], equivalent struts were modelled by assigning nonlinear hinges in the middle of struts. The modelling of hinge was described by Figure 7 [30]. In Figure 7, the ultimate force of nonlinear strut was calculated by multiplying the strength and the area of equivalent strut whereas the elastic force was calculated by multiplying elastic stress which can be assumed around 0.7 of ultimate strength and the area of compressive strut.

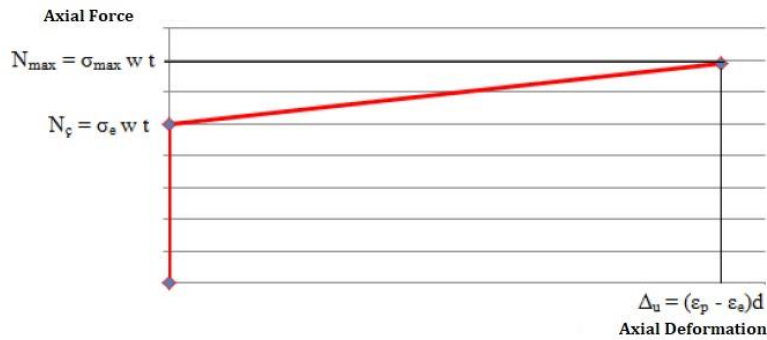


Figure 7. The axial force deformation relationship of nonlinear hinges in the middle of compressive struts [30]

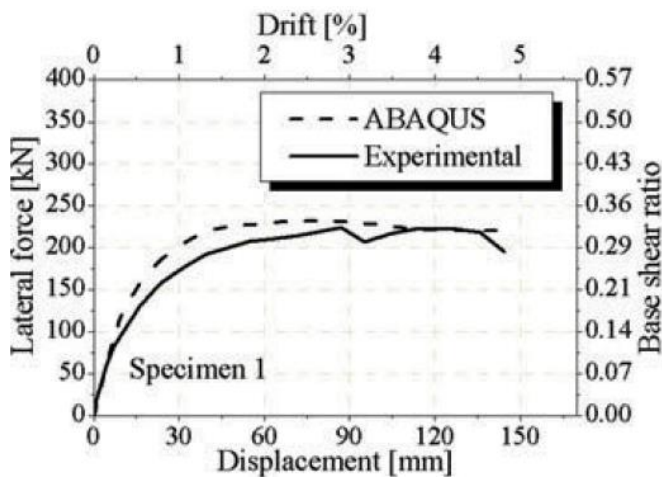
In the modelling of equivalent compressive struts, the equations 4-5 were used. For the modelling of nonlinear hinges in the middle of equivalent struts, the approach explained in Figure 7 was used. In equation 4, the initial rigidity of frames with infills were obtained by using the Abaqus results.

### 3. Results

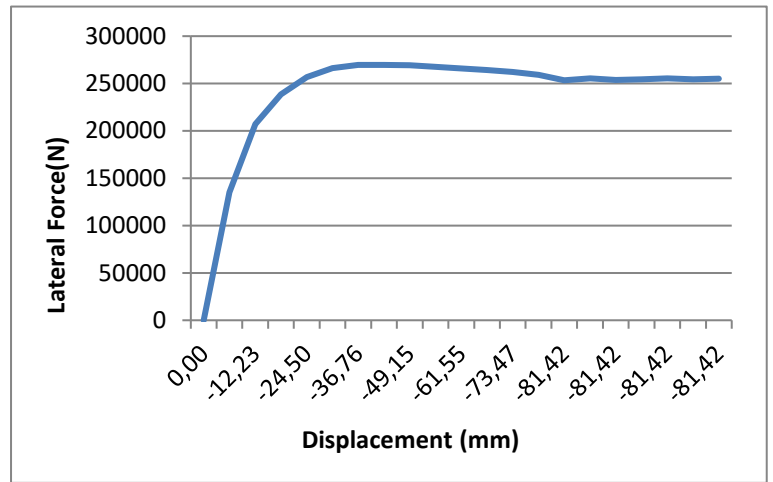
#### 3.1. Load displacement curves of frames modelled in abaqus

As explained before, bare frame was taken from an experimental and numerical study [12]. Also it's modelled in a previous study with equivalent Turkish concrete and steel materials in an another study [13]. The comparison and validation of Abaqus results with the materials used here were done in that study [13]. Here the Abaqus modelling of bare frame were performed by using the same approach. The results can be seen in Figure 8. If Figure 8 is observed it's seen that the frame's behavior is ductile. The maximum lateral load carried by bare frame is

269632.53N. The initial rigidity of bare frame can be calculated as 21886.06 N/mm from the graph by considering the first point where linear elastic behaviour finished. The discrepancy between the experiments and Abaqus graph can be related with differences in Chinese and Turkish materials. Also , analysis could be more precise if more elements were used.



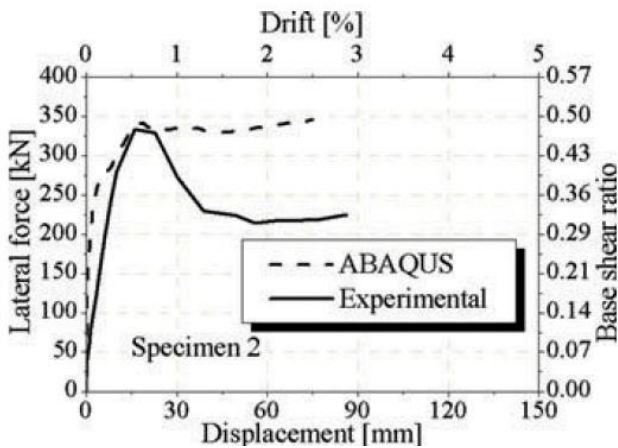
(a)



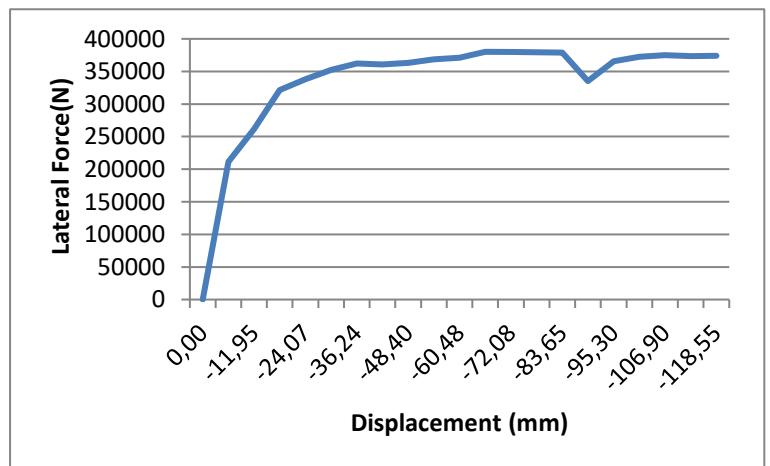
(b)

Figure 8.a. The force displacement curve of bare frame in prior study [12] b. The force displacement curve of bare frame [13]

After the validation of Abaqus analysis by comparing with experiments, the frame with traditionally infilled wall can be analyzed. The frame is loaded around 120mm which indicates 4% lateral drift ratio to see the behavior in large drift. If the traditionally infilled frame is considered, the lateral load capacity is determined as 380109N which is similar with the lateral load capacity of frame with traditionally infilled wall in previous study [12] as seen in Figure 9. The initial rigidity of frame with traditionally infilled wall can be calculated as 35550.32N/m.



(a)



(b)

Figure 9. a. The force displacement curve of traditionally infilled frame in prior study [12] b. The force displacement curve of traditionally infilled frame

In the third kind of frame, the infill wall was strengthened by high strength lightweight concrete panels. As seen in Figure 10, the capacity of frame increased to 1052406.12N level. This is 2.76 times of traditionally infilled frame's capacity and 3.9 times of bare frame's capacity. The initial rigidity can be calculated as 88575.30N/mm. The initial rigidity is approximately 4 times of bare frame and 2.5 times of the frame with traditionally infilled wall.

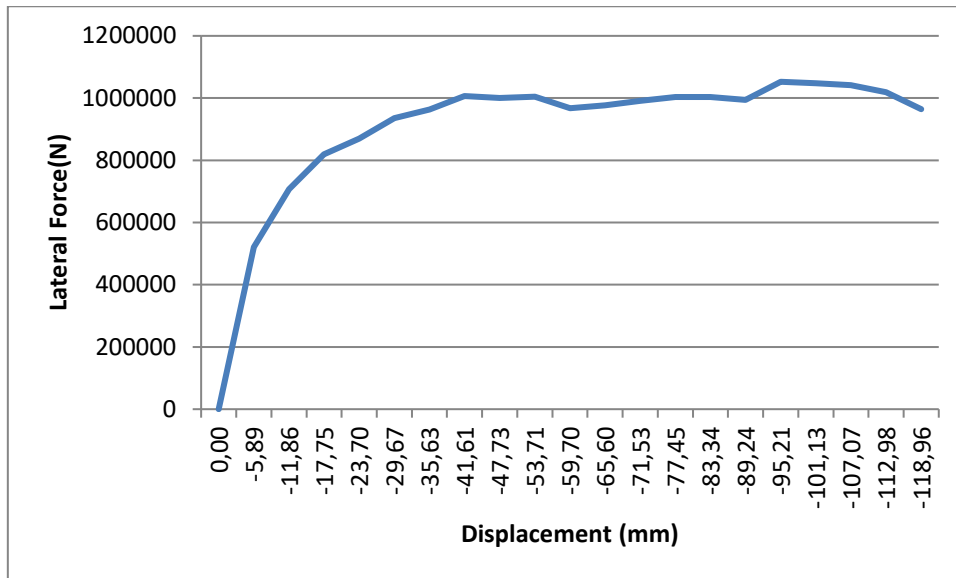


Figure 10. The force displacement curve of frame in which the infill wall was strengthened with panels

In Abaqus, dynamic explicit analysis was performed. In a previous study where a quasi-static loading of a historical wall was performed, the energy balance of the system in Abaqus was explained. Internal energy (EI) (Total strain energy of the material), energy absorbed by viscous damping (Ev), kinetic energy of deforming material (EKE), energy absorbed by frictional forces (EFD), work done by external forces (EW), and the total energy of the system can be written in the same equation as follows [14]:

$$EI + E_v + E_{KE} + E_{FD} + E_W = E_{total} \tag{6}$$

As stated earlier, in equation 6, “the kinetic energy of deforming material” / “total internal energy” ratio must be observed after analysis to check if the analysis can be accepted or not. In Abaqus after the analysis, the energy values for whole model during loading process can be seen. As a general rule, the kinetic energy should not exceed 5% -10% of the internal energy throughout most of the process [14]. As seen in Figure 11, throughout the loading, kinetic energy values are very low for the strengthened frame with lightweight concrete panels. Also, for other frames the ratio is checked and it’s concluded that the analysis can be accepted as a quasi-static loading. In other words, the whole frame models were not accelerated enough to be accepted as a dynamic loading. So, the results can be compared with a quasi-static experiment.

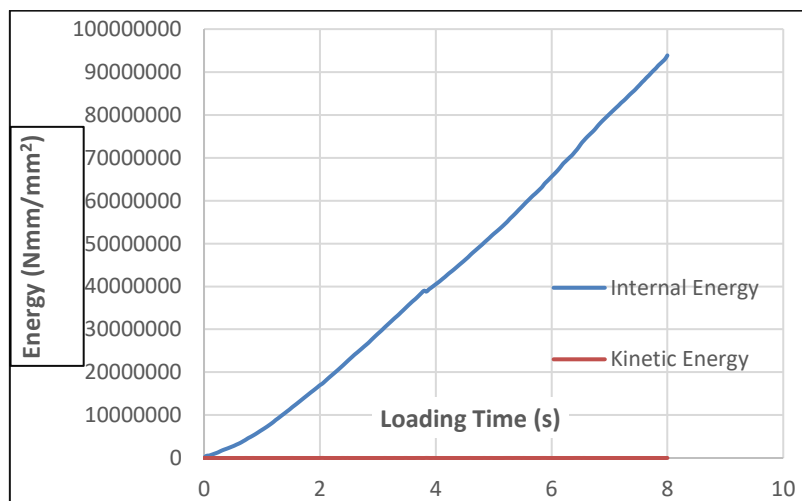


Figure 11. Internal energy and kinetic energy of frame strengthened with panels

### 3.1. Load displacement curves of frames modelled in sap 2000

The frames were modelled in Sap2000 according to the approach explained before in section 2.2. Bare frame is modelled by using plastic hinges. In the frames with traditional and strengthened infill walls, the properties of

equivalent compressive strusses were determined by using equations 4-5. In equations 4-5, every quantity except the width of compressive strut is known. The initial rigidity of frames were derived from Abaqus analysis results. By using the equations 4-5, width of compressive strut of the frame with traditional infill wall is determined as 370mm. To determine the width of the compressive strut of the frame with strengthened infill, first an equivalent axial modulus of elasticity for the strengthened infill was considered as 7344MPa according to equation 7. Later by using this value the width of equivalent strut was calculated as 335mm approximately according to equations 4-5.

$$A_1E_1 + A_2E_2 = (A_1 + A_2) \times E_{eq} \quad (7)$$

In equation 7,  $A_1$  and  $E_1$  indicates the cross-sectional area of brick infill wall and modulus of elasticity of brick infill wall whereas  $A_2$  and  $E_2$  indicates the cross sectional area of high strength lightweight concrete panels.  $E_{eq}$  is the equivalent modulus of elasticity.

The nonlinear hinges in the middle of compressive struts with pinned ends must be determined for modelling. For that purpose, the method explained in Figure 7 was used. For traditionally infilled frame, the elastic force in hinge was determined as 76960 N, and the maximum force was determined as 113950N. Deformation value was calculated as 11.46mm.

For the frame with strengthened infill, again the nonlinear hinge was determined according to Figure 7. For that purpose, first, the ultimate axial strength of strengthened infill must be determined. To determine the ultimate axial strength of infills, equations 8-10 which are taken from a previous experimental study [6] were considered.

$$F_{infillwall} + F_{panels} = F_{strengthened\ wall} \quad (8)$$

$$F_{infillwall} = f_{infill} \times t_i \times w_i \quad (9)$$

$$F_{panel} = 7 \times f_p^{0.25} \times t_p \times w_p \quad (10)$$

In equations 8-10,  $t_i$  and  $t_p$  indicates the thickness of infill wall and panel,  $w_i$  and  $w_p$  indicates the width of infill and panels. Thickness of infill wall is 200mm, width of infill is 335mm, the strength of infill wall is 1.54 MPa and the strength of panels are 85.4 MPa as explained previously. Equation 10 is derived by fitting a curve to the real panel strength of specimens in the previous experiments [6]. Here in the determination of panel strength a calibration was done and panel strength found by equation 10 was increased by a factor of 1.5. In an experimental study, some specimens can have strengths which are lower than expected. The ultimate strength was calculated as 744758N and elastic force in the nonlinear hinge was assumed as 70% of ultimate force. The compressive struts which have pinned ends were modelled linearly with nonlinear hinge in the middle. The load displacement curves and their comparison with abaqus results can be seen in Figure 12,13,14.

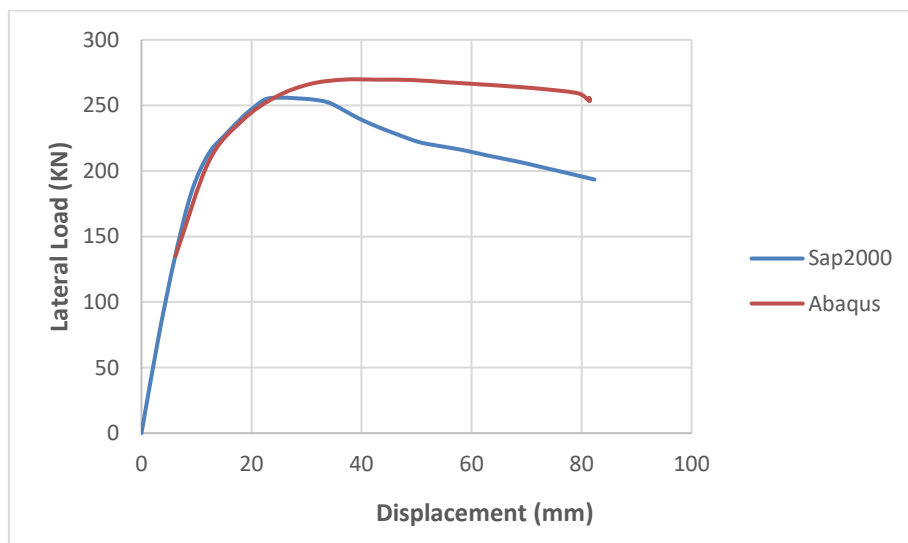
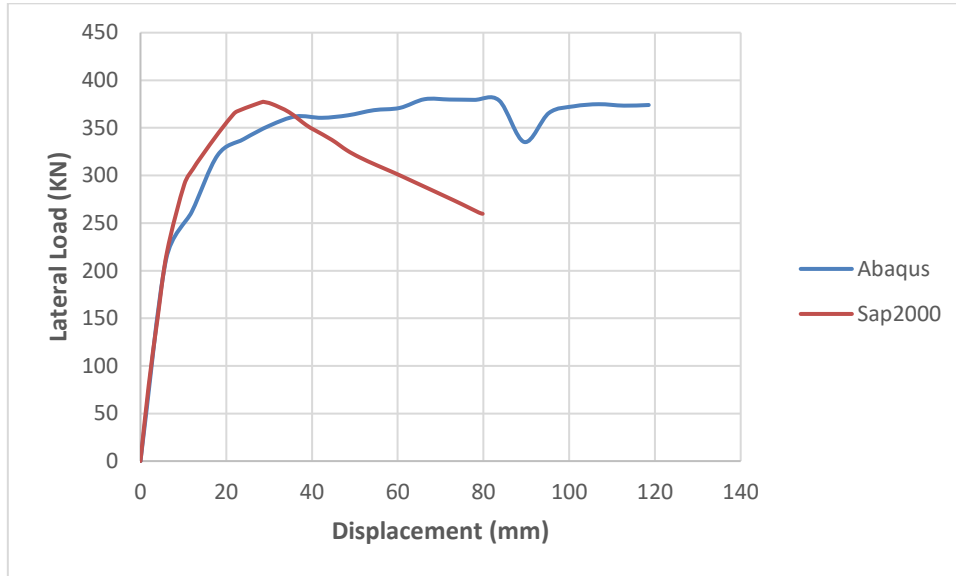
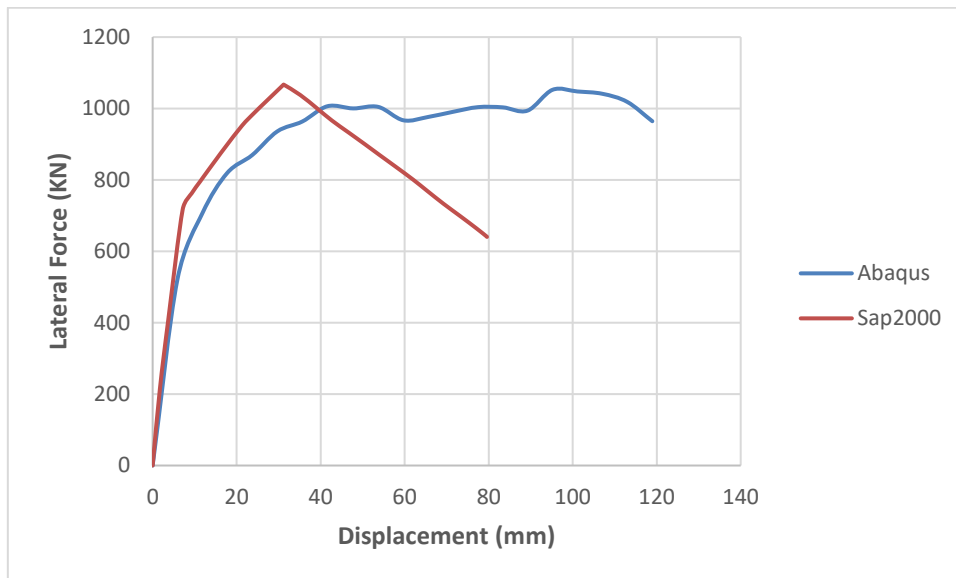


Figure 12. The force displacement curve comparison of bare frame



**Figure 13.** The force displacement curve comparison of frame with infill wall



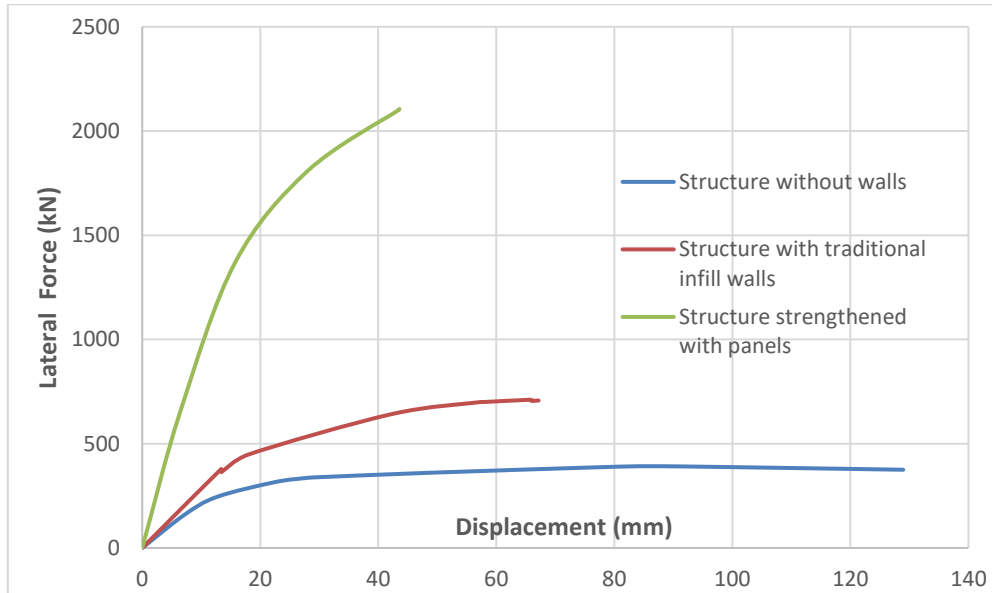
**Figure 14.** The force displacement curve comparison of frame with strengthened infill wall

### 3.2. Load displacement curves of multistory frames modelled in sap 2000

The Sap 2000 analysis was verified by comparing Abaqus results and considered to be representative for the real phenomenon. As explained in section 2.2, modelling of infill walls in multistory structures as equivalent compressive struts is adopted in seismic design codes. Also, in a previous study [31] where nonlinear dynamic analysis of infilled single and multistory RC frames were performed by using equivalent struts and shear spring, the displacements and base shears were compared with experiments and a good agreement was found both for single and multistory frames. In other study [6], the equivalent compressive strut approach for modelling was applied in the nonlinear static (pushover) analysis of 2 story frames and results showed good agreement with experiments. So, the validated modelling for single story frames can be used for multistory frames. Nonlinear static (pushover) analysis were performed on 3 and 5 story frames in order to analyze the effect of proposed strengthened method. In multistory frames, rebars, member dimensions, bay length and story height were taken as same with single story frames. Because the single story frame in the previous experimental study [12] was a representative of RC frames in China. In the multistory bare frame modelling, dead loads excluding the selfweight of RC frame members were considered as 30KN/m and live loads were considered as 20KN/m. In the frame with traditionally infilled wall, wall weight on the beam was assumed as 10KN/m. In the frame with strengthened infill,

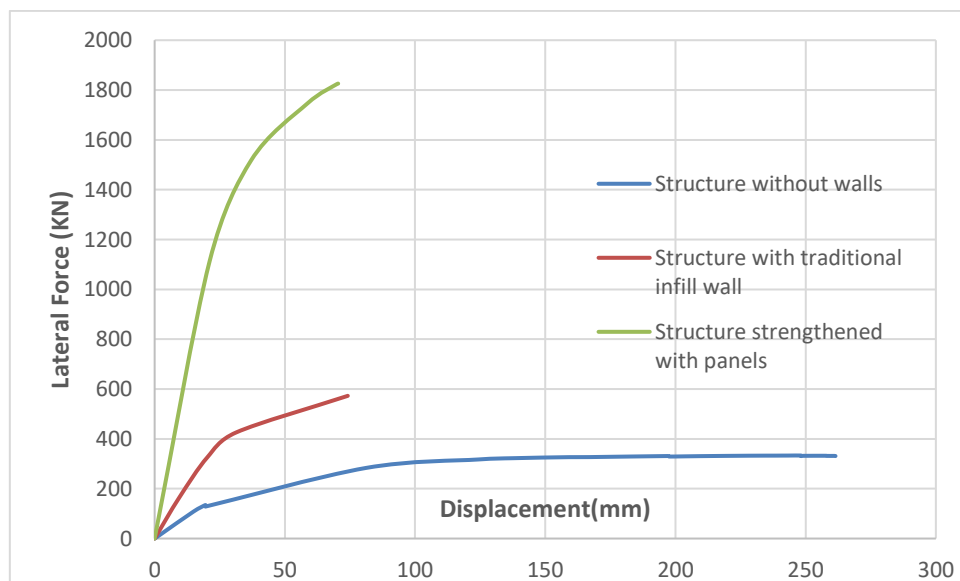
wall weight was taken as 15KN/m. On the frames, first, a vertical pushover analysis were taken into account by using G+nQ combination as explained in TSC-2018 [28], later incremental nonlinear static loading starting from the final results of G+nQ loading was applied n number was assumed to be 0.3.

The same nonlinear hinge approaches which were used to model single story frames were used in the modelling. For 3 story specimens in bare frames no wall is considered. The frames with traditional infill and strengthened infill were modelled by assuming walls in every frame in every story. In Figure 14 and in Figure 15, the pushover curves can be seen. The frame without any walls carried 392.15KN load maximum load at 84mm displacement, the frame with traditional infill wall carried 711.08KN maximum load, the frame with strengthened infill carried 2105.18KN maximum load.



**Figure 14.** The force displacement curves of 3 story frames

If the pushover curves of 3 story frames were observed, in the 3 story frames, traditional infill walls increased the lateral load capacity by 1.81 times when compared with frame without any infill wall. Strengthening infill walls with panels increased the capacity by 3 times when compared with the frame which contains traditional infill walls. However, despite the increase in stiffness and strength, the proposed strengthening method with panels reduced the ductility of structure if the behavior was compared with bare frame without any infill walls.



**Figure 15.** The force displacement curves of 5 story frames



If the pushover curves of 5 story frames were observed, the existence of traditional infill wall increased the lateral load capacity from 332.75KN to 572.75KN. This indicates an increase by a factor of 1.72. The panel strengthening affected the frames and maximum load carrying capacity increased from 572.75 KN to 1825.81KN. This indicates an increase by a factor of 3.18 if the frame with traditional walls and frame with strengthened walls are compared. However, despite the increase in stiffness and strength, the proposed strengthening method with panels reduced the ductility of structure if the behavior was compared with bare frame without any infill walls.

#### 4. Discussion and Conclusion

In this study, the method proposed in previous studies [6,7] was investigated by using full scale frames in Abaqus. Later a validation was performed by using Sap2000 software. With the highlight of these analysis, multistory frames were analyzed in pushover analysis in Sap2000.

In single story full scale frames, it was seen that bare frame carried a max. load of 269632.53N. Traditionally infilled frame carried 380109N which is similar with the lateral load capacity of frame with traditionally infilled wall in previous study [12]. Traditional infill wall increased the load capacity of frame by 40%. The proposed strengthening method for the infill wall increased the load carrying capacity to 88375.30N level. This is 2.76 times of traditionally infilled frame's capacity and 3.9 times of bare frame's capacity. In a prior investigation [7], the application of the proposed method to scaled reinforced concrete (RC) frames, using 7.5mm-sized panels and a polymer binder between the panels and infill wall, resulted in an approximately 2 times increase in lateral load capacity compared to frames with traditional infill. In this study, the retrofitted frame supported 2.76 times more load than its traditionally infilled counterpart. The consistency and even improvement in results suggest that differences may be attributed to variations in concrete strength between the two studies and the influence of the scaling process.

In a previous numerical and experimental study [3], retrofitting frames and infill walls with the proposed method using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) material increased the load capacity of RC frames by a factor of 2 to 3 when compared to non-retrofitted traditionally infilled specimens. Thus, the effectiveness of the strengthening method with high-strength lightweight panels and polymer is comparable to retrofitting with CFRP. In previous study [6], precast panels were employed for strengthening, leading to an increase in lateral load capacity from 65.5-86.6 KN to 148.9-254.7 KN, marking a 3.88-fold improvement in the best case. Although epoxy binder was used in that study, a higher load increase could be anticipated, as reported in the prior study [7]. However, the use of a polymer binder prevents panel detachment from the wall during large drifts and provides a ductile response. The initial rigidity of the bare frame is calculated at 21,886.06 N/mm, while the frame with a traditionally infilled wall has an initial rigidity of 35,550.32 N/m, indicating a 1.62 times increase, as expected. The well-known influence of infill walls on a structure's rigidity and period is evident. The initial rigidity of the retrofitted frame is calculated at 88,575.30 N/mm, approximately four times that of the bare frame and 2.5 times that of the frame with a traditionally infilled wall. This promising result suggests the effectiveness of the proposed method in strengthening structures with insufficient lateral rigidity.

After the validation of single story frame results in Sap2000, it's seen that the modelling of traditionally infilled frame in Sap2000 software is more consistent with real experiments in previous study [12] after 0.01 lateral drift ratio. Validation of Sap2000 results with Abaqus highlighted the way for modelling of multistory frames by using equivalent compressive struts. If the pushover curves of 3 story frames were observed, in the 3 story frames, traditional infill walls increased the lateral load capacity by 1.81 times when compared with frame without any infill wall. Strengthening infill walls with panels increased the capacity by 3 times when compared with the frame which contains traditional infill walls. If the pushover curves of 5 story frames were observed, the existence of traditional infill wall increased the lateral load capacity from 332.75KN to 572.75KN. This indicates an increase by a factor of 1.72. The panel strengthening affected the frames and maximum load carrying capacity increased from 572.75 KN to 1825.81KN. This indicates an increase by a factor of 3.18 if frame with traditional walls and frame with strengthened walls are compared.

In a recent study [14], high strength lightweight concrete wall and metallic elements were proposed to increase the stiffness, ductility, lateral load capacity of structures. The wall was assumed to have interaction with frame also. It was seen that; in the case when wall had interaction with frame, adding high strength lightweight wall and metallic elements to bare frame increased the lateral load capacity of bare frame by 112%. However the proposed method in this study increased the lateral load capacity by 3.9 times when compared with bare frame.

The pushover curves obtained here can be compared with a previous study [32] where frames were modelled in a detailed finite element analysis and later pushover analysis were conducted to multistory frames by using a more practical software using super element approach. In the previous study, adding unreinforced masonry infill walls

to multistory structures increased the lateral load capacity of structure around 4 times when compared with bare frame, but ductility decreased. In this study the behavior of multistory frames showed a similar behavior. The proposed method here increased the lateral load capacity by 3.9 times. So the pushover analysis results are consistent with previous studies.

The proposed method can be applied to strengthen the buildings which has insufficient lateral stiffness and strength. Traditionally, addition of RC walls to the structure was used in practice to enhance the stiffness and strength. But addition of RC walls to structures requires labor and time. Residents must leave the structure during the constructional work. In contrast, the proposed method here aims not to force the residents to be out of the building during the application process. Panel sizes are selected such as that the passage of panels through doors of buildings is possible and practical retrofit can be applied to walls. The polymeric binder between wall and panels is a two-component binder which gets hardened immediately after application. In this study during the in plane loading of RC frames the infill wall's central axis was thought to be same with the central axis of columns and infill wall had interaction with inner surfaces of frame elements as seen in Figure 1. In real applications eccentricity can be observed, thus it's advised here to extend the investigation in future studies. The strengthened infill walls are modelled as equivalent compressive struts here, however they can be modelled as equivalent columns in other investigations.

As a conclusion, the practical method used here is promising for increasing the lateral load capacity and stiffness of existing structures and the proposed modelling approach performed with Sap 2000 will highlight the way to model the behavior for practicing engineers.

## References

- [1] Parsons T., Toda S., Stein, R.,S., Barka, A., Dieterich, J., H. 2000. Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation. *Science* 288(2000) 661-665.
- [2] Le Pichon, X., Şengör, A. C., Kende, J., İmren, C., Henry, P., Grall, C., & Karabulut, H. 2016. Propagation of a strike-slip plate boundary within an extensional environment: the westward propagation of the North Anatolian Fault. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11), 1416-1439.
- [3] Akın,E., Özcebe,G., Canbay, E., Binici, B. 2014. Numerical Study on CFRP Strengthening of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infill Walls *Journal of Composites for Construction*, 18-2
- [4] Özkaynak, H., Sürmeli, M., Yüksel, E. 2016. A capacity curve model for confined clay brick infills. *Bull Earthquake Engineering* 14, 889-918
- [5] Ersoy, U. 2011. Manisa İmo Sempozyumu
- [6] Baran, M., Canbay, E., Tankut, T. 2010. Beton Panellerle Güçlendirme - Kuramsal Yaklaşım . *Teknik Dergi*, 21 (101), 4959-4978.
- [7] Koman, H. 2023. Strengthening of RC Frames With Infill Walls Using High Strength Lightweight Concrete Panels. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies* , 8 (2) , 120-133.
- [8] Kwiecien, A. 2013. Highly deformable polymers for repair and strengthening of cracked masonry structures, *International Journal of Engineering Technology*, 2, 1, pp. 182-196
- [9] Koman, H. 2021. Harçsız bloklar kullanılarak yapıların deprem davranışının iyileştirilmesi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi., Manisa
- [10] Abaqus v16, Dessault Systems
- [11] Sap 2000 v22, Computers and Structures Inc., America
- [12] Zhai C., Kong, J., Wang, X., & Chen, Z. 2016. Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilled RC frames, *Journal of Earthquake Engineering*, 20:7, 1171-1198
- [13] Koman, H. 2023. Improving the Behaviour of RC Frames By Using Lightweight Concrete Panels and Metallic Elements. *Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences* (2023).
- [14] Demir, C. 2012. Seismic Behaviour of Historical stone masonry. Istanbul Technical University Civil Engineering, Phd Thesis, İstanbul
- [15] Santos, C.F.R., Alvarenga, R.C.S.S., Riberio, J.C.L., Castro,L., O., Silva R.M., Santos, A.A.R., Nalon, G.H. 2017. Numerical and Experimental Evaluation of Masonry Prisms By Finite Element Method. *Ibracon Structure and Materials Journal*. 10( 2)
- [16] Obaidat, Y.T. 2011. Structural Retrofitting of Concrete Beams Using FRP, Lund University Civil Engineering, Phd thesis, Lund, Sweden
- [17] Incelet, V. 2016. Nonlinear analysis of earthquake induced vibrations. Aalborg University School of Engineering and Science, Master Thesis. 79s. Aalborg
- [18] Al-Shaikh, I., Falah, N. 2014. Numerical Analysis of Masonry Infilled RC frames, *Journal of Science and Technology* (2014) 19-2
- [19] Gao, J., Sun, W., Morino, K. 1997. Mechanical properties of steel fiber-reinforced high-strength lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites* 19, (1997) 307-313.

- [20] Zhou, Z., Xie, R., Qiao, P., Lu, L. 2019. On the modeling of tensile behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete with freezing-thawing actions. *Composites Part B: Engineering* (2019) 174-1.
- [21] Kwiecien, A. 2014. Shear bond of composites to brick applied highly deformable in relation to resin epoxy interface materials. *Materials and Structures* 47 (2014), 2005-2020
- [22] Viskovic, A., Zuccarino, L., Kwiecien, A., Zajac, B., & Gams, M. 2017. Quick seismic protection of weak masonry infilling in filled frame structures using flexible joints. *Key Engineering Materials*, 747(2017), 628-637
- [23] Abdulla, K. F., Cunningham, L. S., Gillie, M. 2017. Simulating masonry behaviour using a simplified micro model approach, *Engineering Structures*, 151, (2017) 349-365
- [24] Avgın S., Köse, M., M. 2020. Yanal yüklere maruz kalan kolonların Sap2000 ile monotonik ve histeretik analizi. *Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology* (2020) 36-3.
- [25] Eurocode 8 2004. Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
- [26] FEMA 356. 2000. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings.
- [27] Mainstone R.J. 1974. Supplementary note on the stiffness and strength of infilled frames, Building Research Station, CP 13/74, Building Research Establishment, U.K.
- [28] TBEC 2018. Türkiye Building Earthquake Code. Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara
- [29] Amato, G., Fossetti, M., Cavaleri, L., Papia, M. 2009. An updated model of equivalent diagonal strut for infill panels. *Eurocode 8 perspectives from the Italian Standpoint*, Workshop, Napoli, Italy, 119-128.
- [30] Durmazgezer, E. 2013. Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deprem Etkileri Altındaki Davranışının İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Tezi, İzmir
- [31] Smyrou, E., Blandon, C., Antoniou, S., Pinho, R., Crisafulli, F. 2011. Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames, *Bull Earthquake Eng* 9, (2011), 1519–1534
- [32] Totoev, Y., Al Harthy A., 2016. Semi Interlocking Masonry as Infill Wall System for Earthquake Resistant Buildings: A Review, *The Journal of Engineering Research* 13, (2016), 33-41

## Dilsel Özetleme ile Kentsel Hareketlilik Kalıpları: Bisiklet Paylaşım Sisteminden İçgörüler

Fatma Şener Fidan<sup>\*1</sup>, Sena Aydoğan<sup>2</sup>, Diyar Akay<sup>3</sup>

<sup>\*1</sup> Abdullah Gül University, Department of Sustainability Office, KAYSERİ

<sup>2</sup> Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, ANKARA

<sup>3</sup> Hacettepe University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, ANKARA

(Alınış / Received: 16.11.2023, Kabul / Accepted: 27.12.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

### Anahtar Kelimeler

Bisiklet paylaşım sistemi,  
Bulanık kümeler,  
Dilsel özetleme,  
Kentsel hareketlilik,  
Seyahat örüntüsü,

**Öz:** Bu çalışma, tanımlayıcı veri analitiği araçlarından biri olan dilsel özetleme kullanılarak kentsel hareketlilik modellerinin nasıl analiz edilebileceğini incelemiştir. Makale, kentsel hareketlilik modellerini anlamak için zengin bir bilgi kaynağı olan kentsel bisiklet paylaşım sistemi verilerine odaklandı. Çalışmada gün, saat, istasyon ve kullanıcı türü gibi çeşitli değişkenlere sahip bir veri seti kullanıldı. Veriler, bulanık kümenin gücü aracılığıyla kentsel hareketliliğe ilişkin değerli bilgiler sunan dilsel açıklamalara dönüştürüldü. Seyahat modellerinin analizi, günün çeşitli zamanlarındaki yoğun istasyonların belirlenmesini, kullanıcı segmenti tercihlerini (öğrenciler ve öğrenci olmayanlar) ve genel hareketlilikteki değişiklikleri içeriyordu. Kentsel bisiklet verilerinin dilsel özetlemesinin sonuçları, kentsel seyahat kalıpları hakkında daha kapsamlı bir bilgiye olanak sağladı. Kent planlamacıları, karar vericiler ve ulaşım otoriteleri, kentsel hareketlilik dinamiklerine ışık tutan sonuçlar sayesinde kentin mevcut altyapısını optimize edebilir, erişilebilirliği artırabilir ve kent sakinlerinin geniş yelpazedeki ihtiyaçlarını karşılayabilirler. Çalışma, tanımlayıcı veri analitiğinin, özellikle şehir bisikletlerinden elde edilen bilgileri kullanarak seyahat modellerini incelemek için kullanıldığında, bilgiyi açığa çıkarmada ne kadar pratik olabileceğini gösterdi.

## Urban Mobility Patterns with Linguistic Summarization: Insights from the Bicycle-Sharing System

### Keywords

Bicycle-sharing system,  
Fuzzy sets,  
Linguistic summarization,  
Urban mobility  
Travel pattern

**Abstract:** This study examined how urban mobility patterns might be analyzed using linguistic summarization, one of the descriptive data analytics tools. The paper focused on urban bicycle-sharing system data, a rich source of knowledge for comprehending urban mobility patterns. The study used a dataset with several variables: day, hour, station, and user type. The data was turned into linguistic descriptions that offer valuable insights into urban mobility through the strength of the fuzzy set. The analysis of travel patterns included identifying busy stations at various times of the day, user segment preferences (students vs. non-students), and changes in general mobility. The results of the linguistic summarization of the urban cycling data allowed for a more thorough knowledge of urban travel patterns. Urban planners, decision-makers, and transportation authorities may optimize the city's current infrastructure, increase accessibility, and meet its residents' wide range of needs thanks to the results that shed light on the dynamics of urban mobility. The study showed how practical descriptive data analytics can be in revealing information, mainly when used to examine travel patterns utilizing information from urban bicycles.

\*İlgili Yazar, email: fatmasener@gmail.com

## 1. Introduction

The dynamic nature of urban surroundings and the sheer volume of commuters, residents, and tourists add to the complexity of urban mobility statistics [1]. Therefore, analyzing mobility in cities is difficult due to both this complexity and the size of the data. Additionally, metropolitan areas are distinguished by various mobility options, such as personal vehicles, public transportation, bicycle lanes, and pedestrian paths. The data generated by each form of transportation are unique, which increases the complexity of the entire dataset for urban mobility. Metropolitan mobility statistics are further complicated by metropolitan people's diversity and travel habits. Based on variables including demography, socio-economic level, and individual preferences, people have diverse travel patterns and travel preferences. Various data points must be considered when assessing urban mobility patterns due to the heterogeneity in travel behaviours.

It's vital to comprehend mobility trends and travel habits for several reasons [2]. First, it aids decision-makers and city planners in allocating resources wisely and developing appropriate infrastructure. By evaluating traffic patterns, decision-makers can enhance transportation networks and increase overall mobility by identifying peak travel times, congestion hotspots, and locations with insufficient transportation options. Understanding mobility trends also enables proactive planning and foreseeing future transportation requirements. Decision-makers can create policies that address the changing demands of the city's residents and ensure a sustainable and effective transportation system by examining data on changing travel patterns, developing mobility technology, and shifting demographics. Understanding mobility trends and travel habits is also crucial for solving environmental issues.

By examining data on commuting patterns and transportation preferences, policymakers can achieve goals such as reducing carbon emissions, encouraging alternative modes of transportation and sustainable urban mobility options, optimizing transportation networks, and easing traffic congestion. Decision-makers can customize transportation policies, services, and infrastructure to meet the different demands of the city's residents by considering characteristics like user type (such as student or regular), user preferences, and more. Although the diversity of sources and factors used to create urban mobility statistics contributes to the complexity of these statistics, this diversity can contribute positively to the solution of the problems. For decision-makers to manage transportation networks, foresee future needs, address environmental problems, and ultimately improve the quality of urban life, it is essential to understand travel patterns and mobility trends.

The bicycle-sharing system has emerged as a popular mode of public transportation in recent years due to its ability to mitigate environmental effects and alleviate traffic congestion [3]. According to Galatoulas et al. [4], the global presence of shared bicycle networks has expanded to encompass over 2900 systems. Given the projected prominence of cycling as a fundamental mode of transportation in the future, it is imperative for policymakers to investigate the advancements and methodologies within this domain thoroughly [5]. Therefore, examining historical trip data has led to the investigation of bike-sharing systems in numerous cities as documented in existing literature. He et al. [6] employed Poisson regression analysis to examine the data related to Utah. Kaltenbrunner et al. [7] utilized data mining techniques to investigate Barcelona. Kou and Cai [8] focused on extracting statistical patterns of trips in eight US cities, including Boston, Washington DC, Chicago, and New York. Zhou [9] conducted a flow clustering analysis specifically for Chicago. Etienne and Latifa [10] employed a statistical approach based on Poisson mixtures to analyze data from Paris. García-Palomares et al. [11] developed a GIS-based method for studying Paris. Li et al. [12] proposed a hierarchical prediction model for New York and Washington. Kim [13] utilized machine learning techniques to analyze data from Seoul. Eren and Katanalp [14] presented a hybrid approach that incorporated a Fuzzy Logic (FL)-based Geographic Information System (GIS), Analytic Hierarchy Process (AHP), and Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method for studying Izmir. Lathia et al. [15] conducted an empirical spatio-temporal analysis of London. Levy et al. [16] examined transportation and geostatistical models in Tel Aviv, namely regression and all-or-nothing traffic assignment. Similarly, Liu et al. [17] developed an optimization and artificial neural network-based model for analyzing transportation in New York. The significance of this topic and the necessity for novel approaches have been underscored by the utilization of travel chain matrices and transition matrices between activities in the study conducted by Zhang et al. [18] pertaining to Zhongshan. Hence, the primary objective of this study is to elucidate the travel patterns related to the bike-sharing system in Kayseri Province in Türkiye, an area that has not been previously investigated. The study also seeks to furnish decision-makers with crucial insights and information. It is envisaged that the use of the linguistic summarization method, a new approach to urban mobility, will provide significant progress both in the methodological advancement of this discipline and in increasing the efficiency and effectiveness of the bicycle sharing system.

The current study investigated how linguistic summarization might be used to analyze urban mobility trends using bicycle sharing system data. The research aims to transform the raw data into linguistically rich descriptions utilizing a descriptive data analytics technique, specifically linguistic summarization. This research seeks to

identify travel patterns within a city depending on various factors, including day, hour, station, and user type. The ultimate objective is to give concise and simply understandable information about urban mobility, leading to a deeper understanding of travel behaviours and assisting urban planners and transportation authorities in making well-informed decisions.

## 2. Material and Method

The method steps followed are: (i) data collection: urban bicycle data were gathered during a particular period, including attributes like day, hour, station, and user type (student or regular); (ii) the fuzzy variables gathered, (iii) linguistic summarization method was applied to analyze the travel patterns, (iv) discussion of results. This section explained the problem definition following the basics of fuzzy sets and linguistic summarization.

### 2.1. Fuzzy sets

A mathematical framework called fuzzy set theory offers a flexible and accessible method for addressing uncertainty and imprecision in data. The fuzzy set theory allows for degrees of membership in the unit interval  $[0,1]$ , in contrast to classical set theory, which assumes clear boundaries between elements as 0 or 1, allowing for the depiction of ambiguity and gradual changes across categories [19].

A fuzzy set is described as a group of elements where each element has a degree of membership determined by a membership function. On universe  $X$ , a fuzzy set  $\tilde{A}$  is defined as  $\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X\}$  where  $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1]$  is the membership degree of  $x$ . Each element is assigned a value between 0 and 1, representing the degree to which it belongs to the set by the membership function. This level of participation accommodates the inherent ambiguity and uncertainty prevalent in real-world events by allowing for a continuum of options. For example, there is ambiguity when trying to express the time of the day with linguistic descriptions such as *morning* or *noon*. The degree of being noon of 11 a.m. may be 0.75, and the degree of being morning may be 0.25.

When converting fuzzy sets into crisp sets,  $\alpha$  –cuts are used. If the membership degree of an element  $\mu_A(x)$  is greater than or equal to  $\alpha$ , the membership degree of this element to the crisp set defined by  $A_\alpha$  is equal to 1. In the  $\alpha^+$  –cut, if the membership degree of an element  $\mu_A(x)$  is greater than  $\alpha$ , the membership degree of this element to the crisp set defined by  $A_{\alpha^+}$  is equal to 1. The representations of  $\alpha$  –cut and  $\alpha^+$  –cut are given in Eq. (1) and Eq. (2), respectively.

$$A_\alpha = \{x \in X | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (1)$$

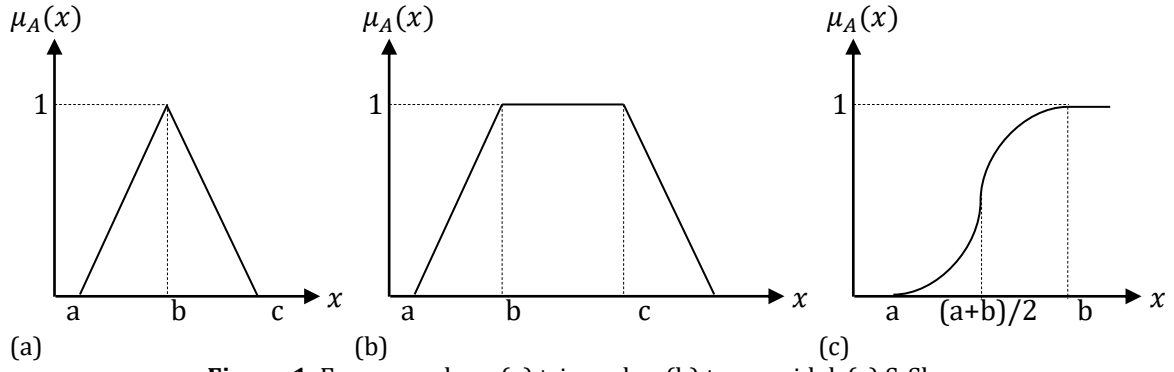
$$A_{\alpha^+} = \{x \in X | \mu_A(x) > \alpha\} \quad (2)$$

Fuzzy numbers are named according to the shape of their membership functions, such as triangular, trapezoidal, S-shape, etc. The most popular membership functions are given in Eq. (3), Eq. (4), and Eq. (5) and shown in Figure 1.

$$Triangular_{a,b,c}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & b < x \leq c \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

$$Trapezoidal_{a,b,c,d}(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 1 & b < x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & c < x \leq d \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{a,b}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2 & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (5)$$



**Figure 1.** Fuzzy numbers (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) S-Shape

Like in classical set theory, union and intersection procedures are supported by fuzzy sets. t-norm operator ( $\otimes: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ) is used for intersection and t-conorm operator ( $\oplus: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ) is used for union. Any of these operators should satisfy the following properties in Table 1.

**Table 1.** Properties of t-norm and t-conorm operators.

	t-norm	t-conorm
Identity / Neutral	$\otimes(x, 1) = x$	$\oplus(x, 0) = x$
Monotonicity	$y_1 \leq y_2$ için $\otimes(x, y_1) \leq \otimes(x, y_2)$	$y_1 \leq y_2$ için $\oplus(x, y_1) \leq \oplus(x, y_2)$
Commutativity	$\otimes(x, y) = \otimes(y, x)$	$\oplus(x, y) = \oplus(y, x)$
Associativity	$\otimes(x, \otimes(y, z)) = \otimes(\otimes(x, y), z)$	$\oplus(x, \oplus(y, z)) = \oplus(\oplus(x, y), z)$

The basic t-norm operator is the minimum operator. A new fuzzy set is created when two fuzzy sets are intersected, and its membership function represents the minimal degree of membership for each element in both sets. The basic t-conorm operator is the maximum operator. When two fuzzy sets are unionized, a new fuzzy set is created whose membership function represents the highest degree of membership that can be assigned to each element in either set. For the fuzzy subsets of the universal set  $A_1$  and  $A_2$ , intersection and union of two fuzzy subsets are given in Eq. (6) and Eq. (7), respectively.

$$\mu_{A_1 \cap A_2}(x) = \otimes(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) = \min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) \quad (6)$$

$$\mu_{A_1 \cup A_2}(x) = \oplus(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) = \max(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) \quad (7)$$

## 2.2. Linguistic summarization

Large databases are mined for insights via a process called data mining. Descriptive techniques are required to summarize and evaluate the data and find patterns and relationships [20]. A straightforward descriptive tool for data analysis is statistical summarization. Though they might be less precise than statistical summaries, consumers frequently prefer natural language summaries because of their superior understanding. Fuzzy quantifiers, first introduced by Zadeh [21,22], are commonly employed in linguistic summarization to handle the equivocal meanings of linguistic labels like *few* and *most*. Yager [23] continued to develop linguistic summarizing studies as a cutting-edge method for drawing out information from databases that is brief and simple to understand. Creating concise and understandable data summaries is the fundamental goal of linguistic summarization.

Two types of protoforms based on absolute and relative quantifiers, introduced by Zadeh are employed in most linguistic summary studies [24]. Absolute quantifiers are defined as a possibility distribution over non-negative integers, while relative quantifiers are defined as a possibility distribution in the unit interval [0,1]. Two types of protoforms are described as follows:

**Type-I protoform:** "Q Y A" [TD]. In this form, Q is a linguistic quantifier, Y is the object, A is a summarizer for any attributes about objects of Y, and TD is the truth degree related to the form. For example, "About 50 of the passengers are students." [0.54]. Here, *about 50* is an absolute linguistic quantifier, the *passenger* is the object, the *student* is a summarizer about the user type attribute of passengers, and *0.54* is the TD of the summary.

**Type-II protoform:** "Q B Y A" [TD]. In this form, in addition to the type-I form, B is a pre-summarizer for any attribute about objects of Y. For example, "Most student passengers rent a bike on weekdays." [0.92]. Here, *most* is a relative linguistic quantifier, *student* is a pre-summarizer about user type attribute of passengers, *passenger* is the object, *weekday* is a summarizer about the day attribute of passengers, and 0.92 is the TD of the summary.

The most essential step in linguistic summarization is evaluating the generated protoforms. Quantified protoforms are assessed by computing the related TDs. If the truth degree cannot be reliably obtained, then the generated summaries cannot reflect the dataset accurately. The most basic TD is proposed by Zadeh [22] according to absolute and relative quantifiers in Eq. (8) and Eq. (9), respectively.

$$TD = \mu_Q \left( \sum_{m=1}^M \mu_A(v_k^m) \right) \quad (8)$$

$$TD = \mu_Q \left( \frac{\sum_{m=1}^M (\mu_A(v_{k_1}^m) \otimes \mu_B(v_{k_2}^m))}{\sum_{m=1}^M \mu_B(v_{k_2}^m)} \right) \quad (9)$$

where  $v_k^m$  is the value for  $k^{\text{th}}$  attribute of  $m^{\text{th}}$  object,  $\mu_A$  is the membership function of summarizer  $A$  for attribute  $k$ ,  $\mu_Q$  is the membership function of linguistic quantifier  $Q$ . Since there is a summarizer and a pre-summarizer ( $A$  and  $B$ ) in type-II protoforms, there are two related attributes as  $k_1$  and  $k_2$ .  $v_{k_1}^m$  is the value for  $k_1^{\text{th}}$  attribute of the  $m^{\text{th}}$  object, and  $v_{k_2}^m$  is the value for  $k_2^{\text{th}}$  attribute of  $m^{\text{th}}$  object.  $\otimes$  is a t-norm operator used for the intersection of two fuzzy sets.

Evaluation methods are grouped under two categories: scalar cardinality-based and fuzzy cardinality-based [25]. Although scalar cardinality-based methods such as Zadeh's are simple, fast, and popular for finding TDs, they have a deficiency, causing inconsistencies in exceptional cases. They rely on counting the occurrences of elements; therefore, they cannot distinguish the difference between the small amount of high and large amount of low membership degrees. To overcome this inconsistency, fuzzy cardinality-based methods, such as the GD and ZS methods, are proposed [26]. Fuzzy cardinality-based techniques such as restriction level-based method [27], gradual number-based method [28], and semi-fuzzy quantifier-based method are also proposed to evaluate linguistic summaries [29,30].

By suggesting a semi-fuzzy quantifier based method, which is a generalized version of a fuzzy linguistic quantifier, Glöckner [31] has contributed to the fusion of linguistics and logic. The characteristics of both the classical and fuzzy quantifiers are present in a semi-fuzzy quantifier, which accepts crisp arguments like a classical quantifier and generates a TD in the range [0,1] like a fuzzy quantifier [29]. Semi-fuzzy quantifiers handle crisp features like a classical quantifier and generate a TD truth degree in unit interval like a fuzzy quantifier. Compared with fuzzy quantifiers, it is easy to define semi-fuzzy quantifiers but hard to evaluate. For example, "About 70% of the passengers are students" can be evaluated by a semi-fuzzy quantifier-based method, "About 70% of passengers rent a bike in the mornings" cannot be evaluated by semi-fuzzy quantifiers without a Quantifier Fuzzification Mechanism (QFM). Being a *student* is a crisp fact in the first phrase, whereas *morning* is a fuzzy phenom in the second phrase.

A probabilistic QFM,  $F^I$ , is proposed as in Eq. (3) by Diaz-Hermida et al. [29].

$$F^I(Q)(X_1, \dots, X_S) = \int_0^1 \dots \int_0^1 Q((X_1)_{\geq \alpha_1}, \dots, (X_S)_{\geq \alpha_S}) d\alpha_1 \dots d\alpha_S \quad (10)$$

where  $X_s$  is a fuzzy property for  $s = 1, \dots, S$ ,  $(X_s)_{\geq \alpha_s}$  is  $\alpha$ -cut of  $X_s$ , and  $Q$  is a semi-fuzzy quantifier of arity  $S$ . If different  $\alpha$ -cuts on  $X_1, \dots, X_S$  are finite,  $F^I$  is defined as in Eq. (4),

$$F^I(Q)(X_1, \dots, X_S) = \sum_{i_1=0}^{m_1} \dots \sum_{i_S=0}^{m_S} Q((X_1)_{\geq \alpha_{1,i_1}}, \dots, (X_S)_{\geq \alpha_{S,i_S}}) m(\alpha_{1,i_1}) \dots m(\alpha_{S,i_S}) \quad (11)$$

where  $0 = \alpha_{s,m_s+1} < \alpha_{s,m_s} < \dots < \alpha_{s,1}$ ,  $\alpha_{s,0} = 1$ ,  $1 \leq s \leq S$ , and the mass assignment corresponding to  $\alpha_{s,j}$  is defined as  $m(\alpha_{s,j}) = \alpha_{s,j} - \alpha_{s,j+1}$ ,  $j = 0, 1, \dots, m_s$ . The distribution of probabilities could be interpreted from mass assignments. Although Martin and Yun [32] initially defined it as a confidence measure, it is now employed for evaluating linguistic summaries.



### 2.3. Problem definition

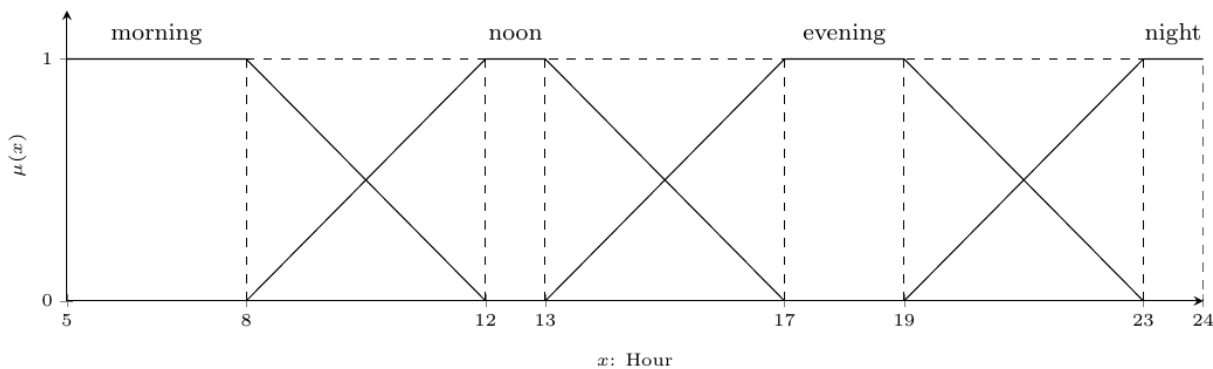
Kayseri Ulaşım A.Ş. operates the Urban Bicycle System (KAYBIS), a shared bicycle system implemented in Kayseri Province, Türkiye. KAYBIS provides services in Kayseri Province with 90 kilometres of bicycle paths, 51 bicycle stations, 1,000 specially designed bicycles, a structure suitable for expansion, and qualified personnel with a level of knowledge and skills. KAYBIS has been awarded the 'Sustainable Development Award' by the International Association of Public Transport (UITP). This study was conducted for KAYBIS in Kayseri, and the data belongs to 2023.

The objective was to effectively assess and analyze the circulation patterns within a community utilizing bicycle data collected over seven days, which covers 17,596 rows of information, including day, hour, station, and card details. This dataset contained essential data, such as the precise time of day, the station where the bicycles were rented, and the type of card used (student or regular). Investigating this dataset makes it possible to learn significant details about usage trends, popular stations during the day, and the preferences of different user segments, such as students and non-students. A sample from the dataset is shown in Table 2.

**Table 2.** The sample data set of bike rental.

ID	User Type	Day	Hour	Station
ID00001	Regular	Monday	05:00	Public Hospital
ID04568	Student	Thursday	21:00	Faculty of Architecture
ID07654	Regular	Sunday	13:00	State Hydraulic Works
ID12980	Student	Friday	16:00	Dormitories

User type is categorized under two values: *regular* and *student*. If the passenger is a student, then the value of the student variable takes the value of 1; otherwise, it is 0. Similarly, if the passenger is a regular passenger, it takes the value of 1; otherwise, it is 0. The day is categorized under two values: *weekdays* and *weekend*. If the boarding is on Monday, Tuesday, Wednesday, Thursday, or Friday, the value of weekdays is 1; otherwise, it is 0. If the boarding is on Saturday or Sunday, the weekend's value is 1; otherwise, it is 0. The station is categorized under 51 variables as *station names* (Public Hospital, Faculty of Architecture, etc.). If the passenger rented a bicycle from any station, the station's value is 1; otherwise, it is 0. The hour is categorized under four values: *morning*, *noon*, *evening*, and *night*, according to the fuzzy membership functions in Figure 2.



**Figure 2.** Fuzzy membership functions according to hours

The pre-summarizer and summarizer of a linguistic summary were selected from the categorized variables above italicized. "*Most*" was used as a linguistic quantifier, defined by a trapezoidal membership function (0.5;0.75;1;1). A total of 3136 linguistic summaries were generated through MATLAB code using a semi-fuzzy quantifier-based method in Eq. (11) [33]. The 173 linguistic summaries had a TD greater than 0, and 38 had a TD greater than 0.80. The final 38 linguistic summaries are given in Table 3.

### 3. Results

This paper utilized a linguistic summarization method to examine the information on the KAYBIS system. The findings of this investigation are shown in Table 3. Out of the total of 38 linguistic summaries acquired, it was determined that three of them pertain to the bicycle utilization period. Weekdays witnessed the highest bicycle utilization levels among students and regular commuters. During weekdays, the morning hours exhibited the highest levels of bicycle activity, as indicated by a TD value of 1. Out of the collected summaries, 18 were associated

explicitly with KAYBIS stations. Patterns were successfully acquired for a total of 18 out of the 51 stations that were included in the analysis.

**Table 3.** Linguistic summaries of -bicycle sharing system

Linguistic Summary	TD
Most students rent a bike on weekdays.	0.92
Most morning passengers rent a bike on weekdays.	1.00
Most noon passengers rent a bike on weekdays.	0.86
Most passengers renting from Aydınlikevler station rent a bike on weekdays.	0.85
Most passengers renting from Ayşe Baldöktü station rent a bike on weekdays.	0.95
Most passengers renting from Bahçelievler station are students.	1.00
Most passengers renting from Beşyol station rent a bike on weekdays.	0.80
Most passengers renting from the public Hospital station rent a bike on weekdays.	0.95
Most passengers renting from the Dental Hospital station rent a bike on weekdays.	0.90
Most passengers renting from East Campus station are students.	1.00
Most passengers renting from East Campus station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from East Terminal station rent a bike on weekdays.	0.83
Most passengers renting from the State Hydraulic Works station are regular passengers.	0.81
Most passengers renting from the Faculty of Education station are students.	1.00
Most passengers renting from the Faculty of Education station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from Emirgan station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from Old Industrial Zone station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from Old Industrial Zone station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from the Faculty station are students.	1.00
Most passengers renting from the Faculty station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from the Faculty of Science and Literature station are students.	1.00
Most passengers renting from the Faculty of Science and Literature station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from Fuzuli station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from Kaskı station are regular passengers.	0.97
Most passengers renting from Koçak station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from Küçükçalık station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from the Faculty of Architecture station are students.	1.00
Most passengers renting from the Faculty of Architecture station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from Mustafa Şimşek station are regular passengers.	1.00
Most passengers renting from Mustafa Şimşek station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from the 30 August station rent a bike on weekdays.	0.86
Most passengers renting from Şeker station rent a bike on weekdays.	0.92
Most passengers renting from Technopark station are students.	0.87
Most passengers renting from Technopark station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from TOKİ station are students.	0.95
Most passengers renting from Yıldız Park station rent a bike on weekdays.	1.00
Most passengers renting from the 19 May station rent a bike on weekdays.	0.93
Most passengers renting from Dormitories station are students.	1.00

The KAYBIS system may be found around the city and contains stations in various districts. Linguistic summaries of stations and usage times were obtained as a result of the linguistic summarization. The information collected as a consequence of linguistic summarization revealed that the number of stations has fallen to 18, and the conclusion that can be drawn from this information is that these stations are used more frequently. It is essential to consider these outcomes when making decisions, such as those involving planning additional stations or an increase in

capacity. Information regarding the different kinds of KAYBIS users and stations can be found in the remaining 17 summaries. Table 4 and Figure 3 show the stations acquired by linguistic summarizing and their station name.

**Table 4.** Station Name and Number

Code	Station Name	Code	Station Name
A	Old Industrial Zone	J	Faculty of Architecture
B	Ayşe Baldöktü	K	Faculty of Education
C	Beşyol	L	Mustafa Şimşek
D	Dental Hospital	M	19-May
E	Aydınlıkevler	N	30 August
F	Public Hospital	O	Technopark
G	Şeker	P	Yıldız Park
H	East Terminal	Q	Faculty
I	East Campus	R	Faculty of Science and Literature



**Figure 3.** Locations of the stations

In contemporary urban environments characterized by fast development, there is a growing imperative to enhance sustainability, mitigate carbon emissions, and maximize urban mobility. Within this particular environment, urban areas encounter many obstacles [34]. These issues encompass a range of elements, including shifts in travel patterns, advancements in technology, alterations in population demographics, and the emergence of pandemic-related risks. Consequently, cities are compelled to reassess and reconsider their conventional transportation plans. This paper seeks to utilize linguistic summarization techniques in the context of bicycle-sharing systems to enhance urban mobility. The primary goal was to equip decision-makers with valuable insights derived from data on evolving travel patterns, advancements in mobility technology, and shifting demographics. These insights can then inform the development of policies that effectively address the evolving needs of city residents. By adopting this approach, urban areas can implement crucial measures to cultivate a sustainable and efficient transportation infrastructure. To optimize the operation of bike share systems, it is imperative to discern recurring usage patterns and ascertain the factors contributing to them, elucidating the underlying demand dynamics [13].

#### 4. Discussion and Conclusion

The study's objective was to evaluate urban cycling data using linguistic summarization techniques so that urban planners and politicians can quickly detect trip patterns, improve infrastructure, and better understand urban mobility dynamics. The study's conclusions are highly significant and provide numerous contributions to the study of urban mobility. First, enhanced insight into travel patterns was provided. Based on bicycle-sharing system data, the study's conclusions provided a better understanding of how people move around the city. The study also announced valuable insights into how people move around in urban environments by identifying popular stations

at various times of the day and examining user preferences. Urban planners, decision-makers, and transportation authorities can use this improved understanding to help them make informed decisions on improving infrastructure and transportation systems. Second, the study's results are highly beneficial for data-driven decision-making because they are based on examining real-world cycling data. The study simplifies complex information using linguistic summarization, enabling clear communication and well-informed decision-making. Third, the study's results contribute to the optimization of urban mobility by pointing out trends and patterns that can be utilized to raise the effectiveness and efficiency of transportation networks. Both city residents and visitors would benefit from improved traffic management, less congestion, and more environmentally friendly mobility options that could arise from this. Finally, the work contributes to the application field by examining urban mobility patterns using linguistic summarization. To sum up, the study's results improved our knowledge of urban mobility patterns and provided practical guidance to decision-makers. The study's conclusions could positively influence urban mobility, leading to the development of cities that are more effective, sustainable, and centred on people. To develop a more thorough understanding of the dynamics of urban mobility, future studies may expand on this approach to include other forms of transportation and explore more variables.

## Acknowledgment

The authors thank Kayseri Ulaşım A.Ş. for their invaluable contributions to this research. The foundation of this work was built upon the data provided by them.

## References

- [1] Sun, L., Axhausen, K.W., 2016. Understanding urban mobility patterns with a probabilistic tensor factorization framework. *Transportation Research Part B: Methodological*, 91, 511–524.
- [2] Oxley, J., 2015. Understanding travel patterns to support safe active transport for older adults. *Journal of Transport & Health*, 2, 79–85.
- [3] Sun, L., Wang, S., Liu, S., Yao, L., Luo, W., Shukla, A., 2018. A complete research on the feasibility and adaptation of shared transportation in mega-cities—A case study in Beijing. *Applied Energy*, 230, 1014–1033.
- [4] Galatoulas, N.F., Genikomsakis, K.N., Ioakimidis, C.S., 2020. Spatio-temporal trends of e-bike sharing system deployment: A review in Europe, North America and Asia. *Sustainability*, 12, 4611.
- [5] Liu, Y., Tian, Z., Pan, B., Zhang, W., Liu, Y., Tian, L., 2022. A hybrid big-data-based and tolerance-based method to estimate environmental benefits of electric bike sharing. *Applied Energy*, 315, 118974.
- [6] He, Y., Song, Z., Liu, Z., Sze, N.N., 2019. Factors influencing electric bike share ridership: Analysis of Park City, Utah. *Transportation Research Record*, 2673, 12–22.
- [7] Kaltenbrunner, A., Meza, R., Grivolla, J., Codina, J., Banchs, R., 2010. Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system. *Pervasive and Mobile Computing*, 6, 455–466.
- [8] Kou, Z., Cai, H., 2019. Understanding bike sharing travel patterns: An analysis of trip data from eight cities. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 515, 785–797.
- [9] Zhou, X., 2015. Understanding spatiotemporal patterns of biking behavior by analyzing massive bike sharing data in Chicago. *PloS One*, 10, e0137922.
- [10] Etienne, C., Latifa, O., 2014. Model-based count series clustering for bike sharing system usage mining: a case study with the Vélib' system of Paris. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 5, 1–21.
- [11] García-Palomares, Jcentrediérrez, J., Latorre, M., 2012. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*, 35, 235–246.
- [12] Li, Y., Zheng, Y., Zhang, H., Chen, L., 2015. Traffic prediction-sharing system, Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. Seattle, Washington, 1–10.
- [13] Kim, K., 2023. Discovering spatiotemporal usage patterns of a bike-sharing system by type of pass: a case study from Seoul. *Transportation*, 1–35.
- [14] Eren, E., Katanalp, B.Y., 2022. Fuzzy-based GIS approach with new MCDM method for bike-sharing station site selection according to land-use types. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103434.

- [15] Lathia, N., Ahmed, S., Capra, L., 2012. Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 88–102.
- [16] Levy, N., Golani, C., Ben-Elia, E., 2019. An exploratory study of spatial patterns of cycling in Tel Aviv using passively generated bike-sharing data. *Journal of Transportation Geography*, 76, 325–334.
- [17] Liu, J., Li, Q., Qu, M., Chen, W., Yang, J., Xiong, H., Zhong, H., Fu, Y., 2015. Station site optimization in bike sharing systems, 2015 IEEE International Conference on Data Mining. IEEE, Atlantic City, NJ, USA, 883–888.
- [18] Zhang, Y., Brussel, M.J., Thomas, T., van Maarseveen, M.F., 2018. Mining bike-sharing travel behavior data: An investigation into trip chains and transition activities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 69, 39–50.
- [19] Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.
- [20] Tan, P., Steinbach, M., and Kumar, V., 2006, *Introduction to Data Mining*, Pearson Education India.
- [21] Zadeh, L.A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8, 199–249.
- [22] Zadeh, L.A., 1978. PRUF—a meaning representation language for natural languages, *International Journal of Man-Machine Studies*, 10, 395–460.
- [23] Yager, R.R., 1982. A new approach to the summarization of data. *Information Sciences*, 28, 69–86.
- [24] Zadeh, L.A., 1983. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages, *Computers & Mathematics with Applications*, 9(1), 149–184.
- [25] Boran, F.E., Akay, D., Yager, R.R., 2016. An overview of methods for linguistic summarization with fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 61, 356–377.
- [26] Delgado, M., Sánchez, D., Vila, M.A., 2000. Fuzzy cardinality based evaluation of quantified sentences. *International Journal of Approximate Reasoning*, 23, 23–66.
- [27] Sánchez, D., Delgado, M., Vila, M.-A., 2009. Fuzzy quantification using restriction levels, *Fuzzy Logic and Applications: 8th International Workshop, WILF 2009 Palermo, Italy*, 28–35.
- [28] Liétard, L., Rocacher, D., 2008. Evaluation of quantified statements using gradual numbers, ss. 246-269. Galinda, J., ed. 2008. *Handbook of Research on Fuzzy Information Processing in Databases*. IGI Global, 926s.
- [29] Díaz-Hermida, F., Bugarín, A., Barro, S., 2003. Definition and classification of semi-fuzzy quantifiers for the evaluation of fuzzy quantified sentences. *International Journal of Approximate Reasoning*, 34, 49–88.
- [30] Díaz-Hermida, F., Losada, D.E., Bugarín, A., Barro, S., 2005. A probabilistic quantifier fuzzification mechanism: The model and its evaluation for information retrieval. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 13, 688–700.
- [31] Glöckner, I., 2000. *Advances in DFS theory*. Technical Report TR2000-01, University of Bielefeld, Technical Faculty, PO-Box 100131, 33501, Bielefeld, Germany.
- [32] Martin, T., & Shen, Y. (2009, June). Fuzzy association rules in soft conceptual hierarchies, NAFIPS 2009-2009 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, Cincinnati, OH, USA, 1-6.
- [33] Matlab, S., 2017, 9.2.0.538062 (R2017a), MathWorks Natick MA.
- [34] Albuquerque, V., Sales Dias, M., Bacao, F., 2021. Machine learning approaches to bike-sharing systems: A systematic literature review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10, 62.

## Medikal Verilerin Sınıflandırılmasında Federe Öğrenme

Beyza Nur AKŞİT<sup>\*1,2</sup> Bahriye AKAY<sup>3</sup> Adam SLOWIK<sup>4</sup>

<sup>\*1</sup> Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yazılım Mühendisliği, AKSARAY

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>3</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>4</sup> Electronics and Computer Science, Koszalin University of Technology, Koszalin, Poland

(Alınış / Received: 01.08.2023, Kabul / Accepted: 20.11.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2023)

**Anahtar Kelimeler**  
Federe Öğrenme,  
İşbirlikçi Öğrenme,  
Medikal Veri,  
Veri Gizliliği,  
Derin Öğrenme

**Öz:** Medikal verilerin sınıflandırılması ve analizi, çeşitli sağlık sorunlarının tanısında ve tedavisinde önemli bir rol oynar. Medikal veriler, içerdikleri hassas bilgiler nedeniyle özel güvenlik önlemlerine gereksinim duyarlar. Bu nedenle, veri paylaşımı olmadan model eğitimi işlemlerinin uç noktalarda gerçekleştirilmesini, veri paylaşımı yerine model parametrelerinin paylaşılmasını ve güncellenmesini sağlayan federe öğrenme yaklaşımları kullanılır. Bu sayede, veriler merkezi bir sunucuda toplanmadığından ve paylaşılmadığından, gizlilik riskleri azalır. Bir federe öğrenme yaklaşımı olan FedAvg, katılan tüm uç noktaların yerel model parametrelerinin ortalamasını alarak küresel modeli günceller. Ancak bu yöntemde, uç noktalar farklı model performanslarına sahip olduğunda yakınsama süresi ve performansı etkileyen sınırlamalar ortaya çıkar. Bu çalışmada bu sınırlamaları ortadan kaldırmak için en yüksek yerel model test doğruluğuna sahip uç noktanın yerel model parametrelerini kullanarak küresel modeli güncelleyen FedBest isimli bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen FedBest yaklaşımı ile FedAvg yaklaşımının performansları BloodMNIST, PathMNIST ve DermaMNIST veri setleri üzerinde kıyaslanmıştır. Deneylemlerden elde edilen sonuçlara göre, FedAvg'nin medikal sınıflandırmada başarılı olduğu ancak FedBest algoritmasının, daha yüksek doğruluk oranlarına ve daha hızlı bir yakınsamaya sahip olduğu görülmüştür.

## Federated Learning for Medical Data Classification

**Keywords**  
Federated Learning,  
Collaborative Learning,  
Medical Data,  
Data Privacy,  
Deep Learning

**Abstract:** The classification and analysis of medical data play a crucial role in the diagnosis and treatment of various health issues. Due to containing sensitive information, medical data require special security measures. Therefore, federated learning approaches are used to perform model training operations at the endpoints without data sharing, allowing the sharing and updating of model parameters instead. This way, privacy risks are reduced as data is not collected and shared on a central server. One federated learning approach called FedAvg updates the global model by taking the average of local model parameters from all participating endpoints. However, this method has limitations on convergence time and performance when endpoints have varying model performances. To address these limitations, this study proposes an approach called FedBest, which updates the global model using the local model parameters of the endpoint with the highest local model test accuracy. The performance of the proposed FedBest approach is compared to the FedAvg approach on the BloodMNIST, PathMNIST, and DermaMNIST datasets. According to the results obtained from the experiments, FedAvg demonstrates success in medical classification, but the FedBest algorithm shows higher accuracy rates and faster convergence.

\*İlgili Yazar, email: aksitbeyza2@gmail.com

## 1. Giriş

Medikal verilerin işlenmesi ve analizi, sağlık alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu verilerin doğru şekilde analizi, hastalıkların erken teşhisi, tedavi planlaması ve hastaların sağlık durumlarının takibi gibi birçok klinik uygulama için hayati önem taşır. Ancak, medikal verilerin gizliliği ve güvenliği konuları, bu alanda çalışan araştırmacılar ve sağlık kuruluşları için önem teşkil etmektedir. Geleneksel olarak, medikal veriler merkezi sunucularda depolanır ve analiz edilir. Ancak, bu yaklaşım güvenlik açıklarına yol açabilir ve hasta gizliliği riskini artırabilir. Özellikle hassas kişisel sağlık bilgileri içeren verilerin merkezi sunucularda toplanması, yetkisiz erişim, veri ihlalleri ve kötü niyetli saldırılar gibi güvenlik risklerini beraberinde getirebilir.

Bu sorunları çözmek ve medikal verilerin gizliliğini korumak için, federe öğrenme yaklaşımı son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Federe öğrenme, verilerin merkezi bir sunucuda bir araya getirilmesi yerine, veri sahipleri arasında dağıtılmış bir öğrenme sürecini kullanır [1]. Bu yöntemde, model eğitimi uç noktalarda gerçekleştirilir ve sadece güncellenmiş model parametreleri merkezi sunucuya iletilir. Bu sayede, medikal veriler uç noktalarda kalır ve gizlilik riski azalırken, aynı zamanda modelin toplam performansı da artırılabilir.

Federe öğrenme, medikal alanda özellikle medikal veri analizinde çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Zhang ve ark. izole medikal kurumlardaki verilerin gizliliğini dikkate alan, COVID19 tespiti yapabilen dinamik füzyon tabanlı bir federe öğrenme yaklaşımı önermişlerdir [2]. Odera, sağlık alanında federe öğrenme uygulaması için yapılan literatür taramasını kapsayan kapsamlı bir inceleme sunmuş, federe öğrenmede karşılaşılan zorluklar ve uygulama çerçevelerini ele almış ve aynı zamanda HIPPA ve GDPR gibi düzenlemelere uygun olarak gizlilik zorluklarına yönelik olası çözümleri tartışmıştır [3]. Sheller ve ark. çok sayıda uç noktada bulunan hasta verilerini paylaşmadan derin öğrenme ile beyin tümörü segmentasyonunu mümkün kılan bir federe öğrenme yaklaşımı önermişlerdir [4]. Yoo ve ark. medikal alanda federe öğrenme ortamı oluşturmak için yönergeler oluşturmuş ve bu yönergelerle birlikte federe öğrenimindeki kritik konuları ortaya koymayı ve uygulanabilir çözümler sunmayı amaçlamışlardır [5]. Wibawa ve ark. medikal verilerin gizliliğini ve güvenliğini artırmak için federe öğrenmede homomorfik şifreleme yaklaşımı önermişlerdir [6]. Farhad ve ark. Medikal Nesnelerin İnterneti'nde (IoMT) veri yönetimi ve mahremiyet sorununu ele almak için federe öğrenmenin potansiyelini tartışmışlardır [7]. Zhao ve Huang, bağımsız ve özdeş dağılımlı (Independent and Identically Distributed, IID) olmayan İveri sorunlarının yaygın olduğu medikal kurumları arasındaki her uç noktada yerel olarak veri üretirek uç noktalar arasında IID olmama durumunu azaltan, medikal görüntü sınıflandırmasına yönelik bir yenilikçi dağıtım bilgi paylaşımı federe öğrenme yöntemi olan FedDIS'i önermiştir. Deneysel sonuçlar, FedDIS'in IID olmayan veri senaryolarında Alzheimer hastalığı MRI ve MNIST veri kümeleri üzerindeki federe öğrenme performansının önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir [8]. Sohan ve Basalamah, medikal görüntü analizinde federe öğrenme üzerine sistematik bir inceleme yürütmüşlerdir [9]. Yi ve ark. hasta verilerinin gizliliğini sağlamak, büyük miktarda etiketli veri toplama ve üretme maliyetini ortadan kaldırmak için federe öğrenme tabanlı bir medikal teşhis yöntemi önermişlerdir [10]. Nazir ve Kaleem, derin sinir ağları ile medikal görüntü analizinde federe öğrenme uygulamalarını incelemiş, federe öğrenme model performansını artırmak için yapılan bazı çalışmalara değinmiş ve federe öğrenmenin gelecekteki araştırma yönlerini vurgulamışlardır [11]. Genel olarak, bu çalışmalar federe öğrenmenin medikal veri analizinde yüksek doğruluk elde ederken mahremiyeti koruyabilme potansiyelini göstermiştir.

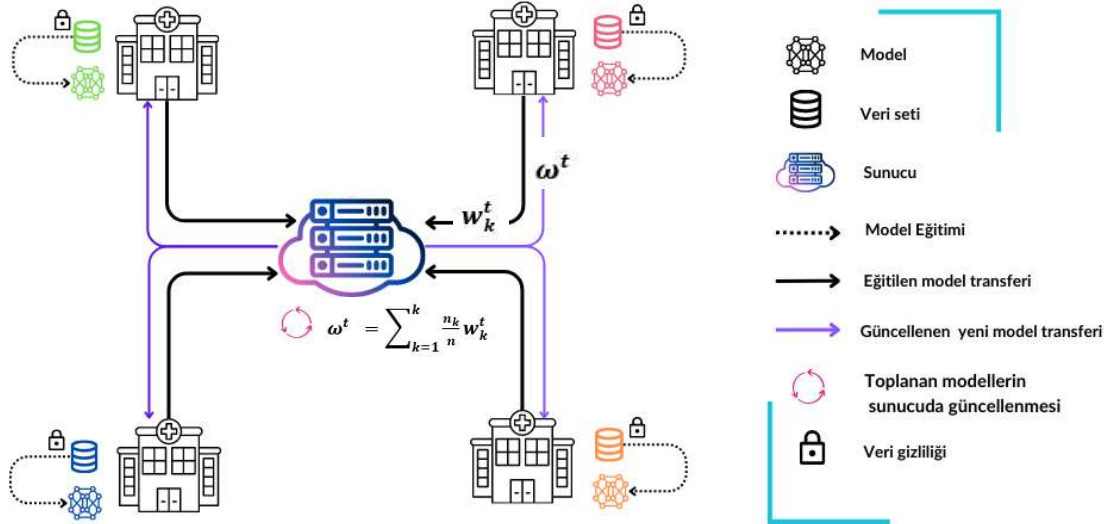
Bu çalışmanın amacı, medikal verilerin sınıflandırılmasında daha yüksek doğrulukta ve hızlı yakınsayabilen bir federe öğrenme yaklaşımı sunmaktır. Yeni bir federe öğrenme yaklaşımı olarak FedBest yaklaşımı önerilmiş ve literatürde yaygın kullanılan FedAvg yöntemi ile BloodMNIST, PathMNIST ve DermaMNIST veri setleri üzerinde kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, FedBest yaklaşımı, küresel model test doğruluğu bakımından FedAvg yöntemine göre daha hızlı yakınsama elde ederek daha yüksek performans göstermiştir. Özellikle DermaMNIST ve BloodMNIST veri setlerinde, FedBest yaklaşımının daha yüksek başarı elde ettiği gözlenmiştir. DermaMNIST veri seti üzerinde, FedAvg yaklaşımında üç eğitim turu sonunda küresel model performansı %67,07'den %71,86'ya yükselirken, FedBest yaklaşımında ise %68,26'dan %73,05'e yükselmiştir. BloodMNIST veri seti için ise, FedAvg yaklaşımında üç eğitim turu sonunda küresel model performansı %37,68'den %84,51'e yükselirken FedBest yaklaşımında ise %73,94'ten %84,86'ya yükselmiştir. Bu sonuçlar, medikal veri sınıflandırma görevlerinde FedBest yaklaşımının Federe öğrenme süreci için etkili bir alternatif olabileceğini vurgulamaktadır.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir: Birinci bölümde konuyla ilgili literatüre sunulan çalışmalar verilmiştir. İkinci bölümde, federe öğrenme yöntemleri ilgili bilgiler verilerle önerilen yöntem sunulmuştur. Üçüncü bölümde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Dördüncü bölümde ise tartışma ve sonuca yer verilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Federe Öğrenme Mimarisi

McMahan ve ark. [14] tarafından 2016'da önerilen Federe öğrenme [12,13], birden çok uç noktanın, verilerini merkezi bir sunucuya paylaşmadan küresel bir modelin eğitilmesine olanak tanıyan dağıtılmış bir makine öğrenimi tekniğidir. Federe öğrenmenin temel süreci Şekil 1'de gösterildiği üzere şu şekilde ilerler: İlk olarak, bir başlangıç modeli sunucu tarafından seçilen uç noktalara gönderilir. Daha sonra seçilen uç noktalar, kendi verileriyle yerel modeli eğitirler. Ardından, bu yerel modeller, güncellenmiş yerel model parametrelerini merkezi sunucuya gönderir. Sunucu, aldığı güncellenmiş parametreleri bir araya getirir ve küresel modeli günceller. Bu güncellenmiş küresel model tekrar uç noktalara gönderilir ve bu süreç tekrarlanır. Her iterasyonda, uç noktalar kendi verileri üzerinde öğrenme yapar, güncellemeleri paylaşır ve merkezi sunucu küresel modeli günceller. Bu şekilde, verilerin merkezi bir sunucuya gönderilmesi yerine, sadece güncellenmiş parametrelerin paylaşılmasıyla öğrenme gerçekleştirilir. Böylece, kullanıcıların veya veri sahiplerinin gizliliği korunurken, küresel model de sürekli olarak iyileştirilir.



Şekil 1. Federe öğrenme süreç şeması



### 2.2.1. Federated Averaging (FedAvg)

Google tarafından 2016 yılında önerilen FedAvg [15] yaklaşımında küresel modelin güncellenmesinde her bir uç noktadaki yerel model parametrelerinin ortalama bilgisinden faydalanılır. Her uç nokta, ham verilerini merkezi sunucuya göndermeden ve diğer uç noktalarla paylaşmadan model eğitim sürecine katkıda bulunur ve bu da Federe öğrenmeyi merkezi olmayan ortamlarda gizliliği koruyan değerli bir yaklaşım haline getirir. Algoritma 1’de FedAvg Algoritması sunulmuştur.

**Algoritma 1.** FedAvg algoritması [16].  $K$ ,  $k$  değişkeni tarafından endeksli uç nokta sayısı;  $n$  bütün katılımcılarda bulunan toplam örnek sayısı;  $n_k$   $k$ ’nci katılımcının örnek sayısı,  $B$ , yerel minibatch boyutu;  $E$ , yerel epoch sayısı ve  $\eta$ , öğrenme oranıdır.

---

**FedAvg Algoritması**

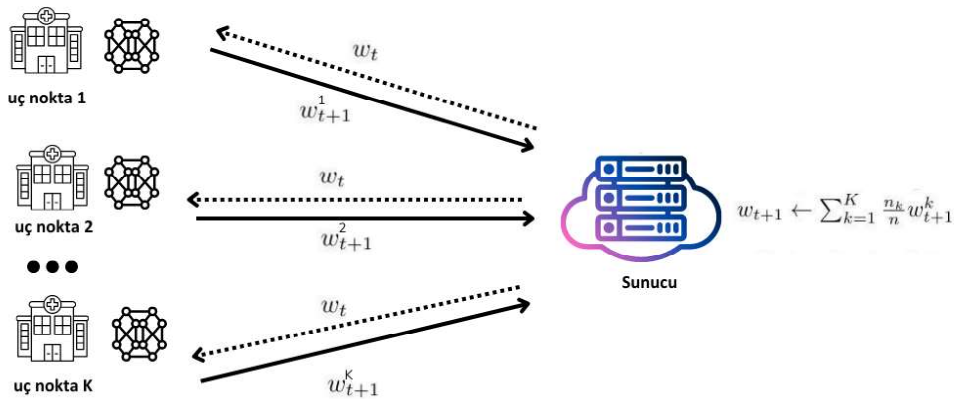
---

**[Sunucu]:**  
 Başla  $w_0$   
**for** her  $t=1,2,\dots$ **do**  
    $m \leftarrow \max([C.K], 1)$   
    $S_t = \text{rastgele } m \text{ katılımcı ayarla}$   
   **for** her katılımcı için  $k \in S_t$  **in parallel do**  
      $w_{t+1}^k = \text{YerelGuncelle}(k, w_k)$   
    $w_{t+1} \leftarrow \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} w_{t+1}^k$

**[Yerel]:**  
**YerelGuncelle**( $k, w_k$ ):  
**for** her yerel epoch  $i \in [1, E]$  **do**  
   Yerel verileri böl,  $B$  ( $\frac{B}{n_k}$   $B$  yığınları)  
   **for** yığın  $b \in B$  **do**  
      $w_{t,k} \leftarrow w_{t,k} - \eta_{\text{yerel}} \Delta l(w_{t,k}; b)$   
**return**  $w$  to sunucu

---

Merkezi sunucuda,  $k$  değişkeni tarafından endekslenen  $K$  sayıda uç nokta seçilir. Seçilen uç noktalarda eğitilen yerel modellerin parametreleri merkezi sunucuya  $\text{YerelGuncelle}()$  işlevi ile gönderilir. Son olarak, sunucu,  $K$  sayıda uç noktadan alınan tüm yerel model parametrelerinin ( $w_{t+1}^k$ ) ortalamasını alarak küresel modeli günceller. Şekil 2’de FedAvg yaklaşımı sürecinin şeması sunulmuştur.



**Şekil 2.** FedAvg yaklaşımı süreç şeması.

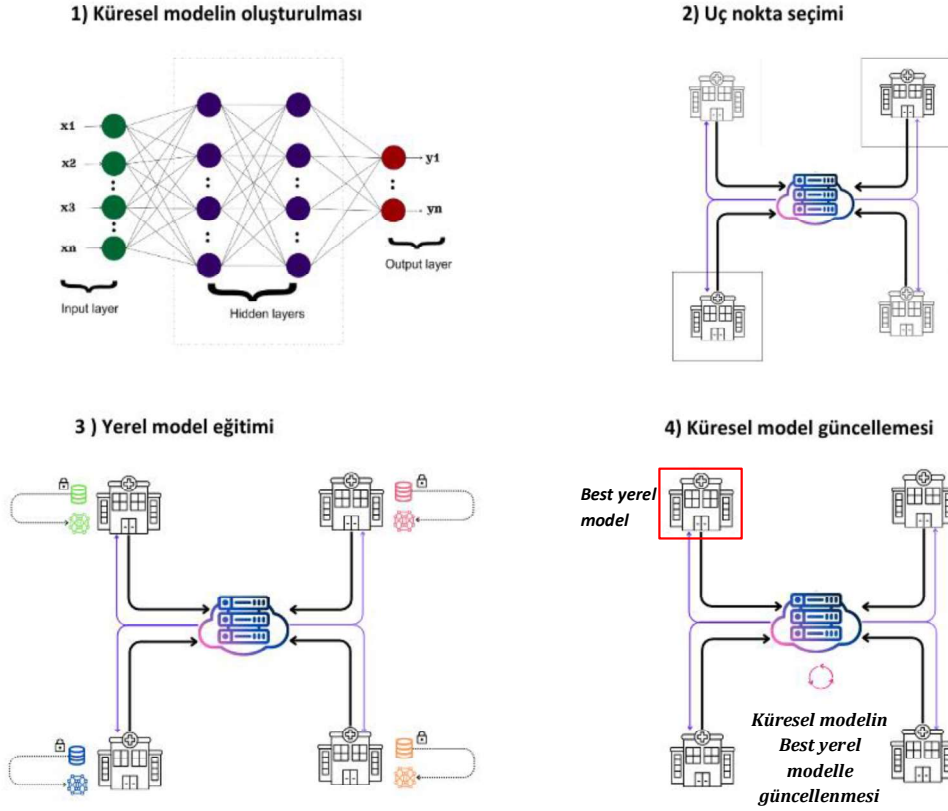
## 2.2.2 FedBest

FedBest, federe öğrenme sürecindeki en iyi performans gösteren yerel model parametrelerini kullanarak küresel modeli güncellemeyi amaçlayan bir yaklaşımdır. FedBest algoritmasının temel adımları Algoritma 2'de verilmiştir:

**Algoritma 2.** FedBest algoritmasının temel adımları

<b>FedBest Algoritması</b>
1. Başlangıç küresel modelin oluşturulması.
2. Rasgele uç noktaların seçilmesi.
<b>repeat</b>
3. Seçilen uç noktanın yerel model güncellemesi yapması:
a. Seçilen uç nokta, yerel verilerini kullanarak yerel modeli eğitir.
b. Güncellenen yerel model, merkezi sunucuya iletilir.
4. Küresel model güncelleme işlemi:
a. Merkezi sunucu, tüm uç noktalardan gelen yerel modelleri alır.
b. Küresel model, en iyi performans gösteren yerel modelin parametreleri ile güncellenir.
<b>until</b> Belirli bir durum sağlanana kadar (örneğin, maksimum iterasyon sayısına ulaşılanaya kadar veya belirli bir durma kriterine kadar).

1. **Başlangıç küresel modelin oluşturulması:** Oluşturulan başlangıç küresel model, verilerin özelliklerini yakalamak ve sınıflar arasında ayırım yapmak için etkili bir yapıda olmalıdır. Bu çalışmada CNN (Convolutional Neural Network) tabanlı bir başlangıç modeli oluşturulmuştur.
2. **Rastgele uç noktaların seçilmesi:** Rastgele uç nokta seçimi, federe öğrenme sürecinin dağıtılmış ve işbirlikçi yapısını sağlar. Farklı uç noktaların katılımı, daha çeşitli ve kapsayıcı bir veri seti temsili anlamına gelir. Bu da küresel modelin daha genel ve güncel bir şekilde güncellenmesini sağlar.
3. **Seçilen uç noktaların yerel model güncellemesi yapması:**
  - a. **Seçilen uç nokta, yerel verilerini kullanarak yerel modeli eğitir:** Her seçilen uç nokta, kendi yerel verilerini kullanarak eğitim işlemini gerçekleştirir. Yerel model, uç noktanın sahip olduğu veriye özgü bilgileri içerir ve yerel eğitim süreci boyunca güncellenir.
  - b. **Güncellenen yerel model, merkezi sunucuya iletilir:** Uç noktalardaki yerel eğitim tamamlandıktan sonra güncellenen yerel model, merkezi sunucuya iletilir.
4. **Küresel model güncelleme işlemi:**
  - a. **Merkezi sunucu, tüm uç noktalardan gelen yerel modelleri alır.**
  - b. **Küresel model en iyi performans gösteren yerel modelin parametreleri ile güncellenir:** Merkezi sunucu, alınan yerel modeller arasından en iyi performans gösteren modeli seçer. Bu yaklaşım, küresel modelin daha iyi performans gösteren yerel modelin bilgisini küresel modele entegre etmesini sağlar. En iyi performans gösteren yerel model parametreleri, küresel modelin performansını artırmak için kullanılır. Şekil 3'te FedBest yaklaşımı süreç şeması sunulmuştur.



Şekil 3. FedBest yaklaşımı süreç şeması.

### 3. Deneysel Çalışmalar ve Bulgular

Bu bölümde, FedAvg ve bu çalışmada önerilen FedBest yaklaşımlarının medikal veri sınıflandırmada etkinliklerini değerlendirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmada sınıflandırma algoritması olarak CNN (Convolutional Neural Network) mimarisi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında uç nokta sayısı dört olarak belirlenmiştir yani, federe öğrenme, CNN modelinin dört uç noktadan oluşan merkezi olmayan bir ağ üzerinde eğitilmesini içeriyor. Medikal veriler, dört uç noktaya eşit şekilde dağıtıldıktan sonra veriler uç noktalarda kalmış ve bu şekilde veri gizliliği ve güvenliği sağlanmıştır. CNN modeli, her uç noktanın kendi verileri üzerinde yerel olarak eğitilmiş ve böylece her uç noktanın veri kümesinin belirli özelliklerinden öğrenmesine olanak sağlamıştır. Yerel eğitimden sonra, küresel bir model oluşturmak için dört uç noktadan alınan yerel modeller sunucuda bir araya getirilmiştir. Federe öğrenme algoritmalarından FedAvg yaklaşımının performansı ve önerilen FedBest yaklaşımının performansı BloodMNIST, PathMNIST ve MedMNIST medikal veriler ile yapılan deneyler üzerinden değerlendirilmiştir.

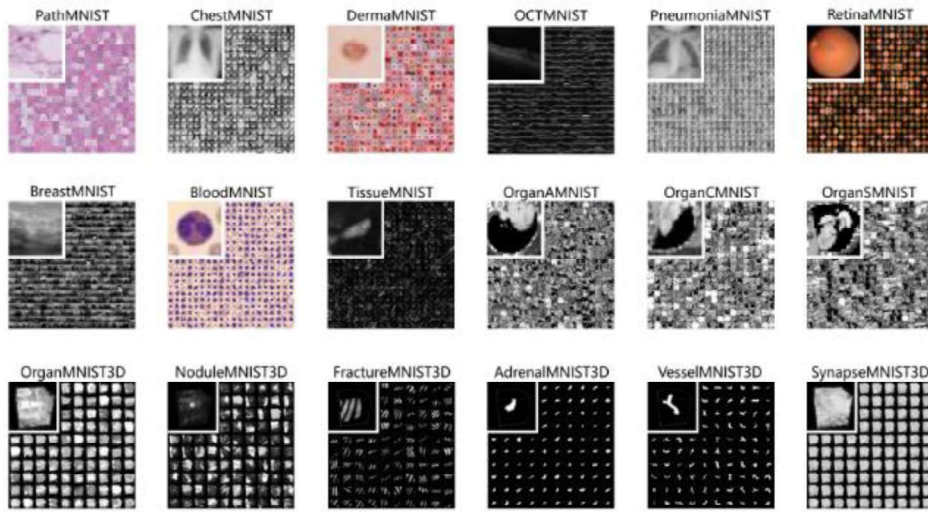
Modeller Google Colab'da Python programlama dili ile kodlanmıştır. Deneyler Intel (R) Core (TM) i7-10750H 2.6 GHz işlemci, 16 GB RAM ve Windows 11 işletim sistemi bulunan bilgisayar ile yapılmıştır. Bu çalışmada, Keras kütüphanesi kullanılarak bir CNN modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan CNN modelin mimarisine ait parametreler Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo1.** CNN Modelinin yapısı ve parametre sayısı

Layer(type)	Output Shape	#parameters
conv2d(CONV2D)	(None,26,26,28)	784
Max_pooling2d(MaxPooling2D)	(None,13,13,28)	0
Conv2d_1(CONV2D)	(None,11,11,56)	14168
Max_pooling2d_1(MaxPooling2D)	(None,5,5,56)	0
Conv2d_2(CONV2D)	(None,3,3,56)	28280
flatten (Flatten)	(None,504)	0
dense (Dense)	(None,56)	28280
dense_1(Dense)	(None,10)	570
Droupout (Droupout)	(None,10)	0
<b>Total parameters</b>	-	72,082
<b>Trainable parameters</b>	-	72,082
<b>Non-trainable parameters</b>	-	0

### 3.1. Veri Seti

Şekil 4'te bazı örnekleri verilen MedMNIST, standartlaştırılmış biyomedikal görüntüler içeren geniş ölçekli bir veri kümesidir. 2-Boyutlu (2B) 12 veri kümesi ve 3-Boyutlu (3B) 6 veri kümesi içermektedir. MedMNIST, farklı veri ölçeklerinde (100'den 100.000'e kadar) ve farklı görevlerde (ikili / çok sınıflı, ordinal regresyon ve çok etiketli) 2B ve 3B görüntüler üzerinde sınıflandırma yapmak için tasarlanmıştır. Tüm görüntüler, ilgili sınıflandırma etiketleriyle birlikte 28 x 28 (2B) veya 28 x 28 x 28 (3B) boyutlarına önceden boyutlandırılmıştır. Biyomedikal görüntülerdeki farklı veri türlerini kapsayan toplamda 708.069 adet 2B görüntü ve 9.998 adet 3B görüntü içermektedir [18].



**Şekil 4.** MedMNIST 'e genel bakış

Bu çalışmada, medikal görüntülerden oluşan MEDMNIST veri setinden BloodMNIST, PathMNIST, DermaMNIST kullanılarak deneyler yapılmıştır.

#### 3.1.1 BloodMNIST Veri Seti

BloodMNIST veri kümesi, enfeksiyon, hematolojik ya da onkolojik hastalığı olmayan ve kan toplama anında herhangi bir farmakolojik tedavi görmeyen bireylerin normal hücrelerinden elde edilen bir veri kümesidir. Toplam 17.092 görüntü içermektedir ve 8 sınıfa ayrılmıştır. Kaynak veri kümesi eğitim, doğrulama ve test seti olmak üzere 7:1:2 oranında bölünmüştür. Kaynak görüntülerin çözünürlüğü  $3 \times 360 \times 363$  pikseldir ve merkezden kırılarak  $3 \times 200 \times 200$  boyutlarına indirgenmiş, ardından  $3 \times 28 \times 28$  boyutlarına yeniden boyutlandırılmıştır [18].

### 3.1.2. PathMNIST Veri Seti

PathMNIST, kolorektal kanser histoloji slaytlarından sağkalım tahminine yönelik 100.000 adet görüntü yaması (NCT-CRC-HE-100K) ve farklı bir klinik merkezden sağlanan 7.180 adet görüntü yaması (CRC-VAL-HE-7K) içeren bir veri setidir. Veri seti, 9 farklı doku türünden oluşur ve çok sınıflı sınıflandırma görevini içerir. Kaynak görüntüleri  $3 \times 224 \times 224$  piksel boyutundan  $3 \times 28 \times 28$  piksele yeniden boyutlandırılmıştır. NCT-CRC-HE-100K 9:1 oranında eğitim ve doğrulama setlerine ayrılmıştır. CRC-VAL-HE-7K test seti olarak kullanılmaktadır [18].

### 3.1.3. DermaMNIST Veri Seti

DermaMNIST, yaygın pigmentle cilt lezyonlarının çok kaynaklı dermatoskopik görüntülerinin büyük bir koleksiyonu olan HAM1000019,20,21 temel alınarak oluşturulmuştur. Veri kümesi, 7 farklı hastalığa ait sınıflandırılmış 10.015 dermatoskopik görüntü içermektedir ve çoklu sınıf sınıflandırma görevi olarak tanımlanmıştır. Görüntüler eğitim, doğrulama ve test setlerine 7:1:2 oranında bölünmüştür. Kaynak görüntülerin boyutu  $3 \times 600 \times 450$ 'dir ve  $3 \times 28 \times 28$  boyutuna yeniden boyutlandırılmıştır [18].

## 3.2. MedMNIST Veri Seti Deneysel Sonuçları

Kullanılan MedMNIST veri setlerinin adil bir şekilde dağıtılmasını sağlamak için eğitim veri seti eğitim öncesi karıştırılmış ve dört uç nokta arasında eşit olarak paylaştırılmıştır. Eğitim sürecinde her turda ve her uç noktada eğitilen model için aynı sayıda epoch sayısı kullanılmıştır ve modelin aşırı öğrenmesini önlemek için federe öğrenme eğitim turu sayısı üç olarak belirlenmiştir. Tablo 2-4'te, BloodMNIST, PathMNIST ve DermaMNIST için her bir uç noktanın yerel olarak eğitilmiş modellerin performansını yansıtan eğitim doğruluğu ve test doğruluğu metrikleri sunulmaktadır. Yerel modellerin bir araya getirilmesiyle elde edilen küresel modelin test sonucu da Tablo 2-4'ün son satırlarında gösterilmektedir.

### 3.2.1. BloodMNIST Veri Seti Deneysel Sonuçları

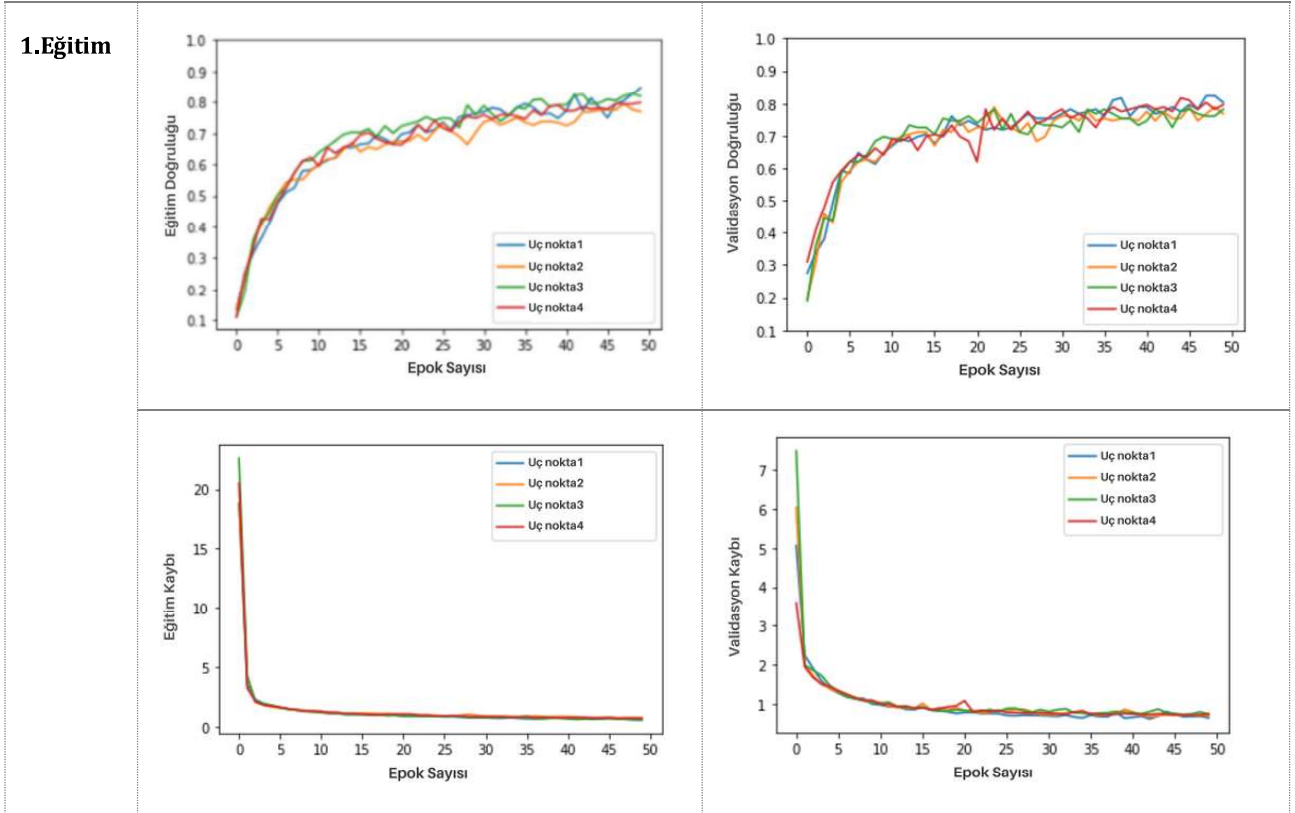
Tablo 2, BloodMNIST veri seti için FedAvg ve FedBest yaklaşımlarına ait üç eğitim turundaki sınıflandırma sonuçlarını sunmaktadır. Tablo 2'deki sonuçlar, FedAvg ve FedBest yaklaşımları için üç eğitim turunun sonunda, tüm uç noktadaki yerel model doğruluklarının ilk turdaki eğitim sonuçlarına göre nispeten yüksek doğruluk değerlerine ulaştığını göstermektedir. FedAvg yaklaşımı kullanılarak eğitilen küresel model, üçüncü eğitim turundan sonra %84,51'lik bir doğruluk elde ederken, FedBest yaklaşımında %84,86'lık bir doğruluk elde etmiştir. Bu değerler, modelin doğruluğunu geliştirmede her iki yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. FedAvg ve FedBest yaklaşımlarında, uç noktaların yerel model doğruluk değerleri üç eğitim turu gerçekleştirildikten sonra incelendiğinde, önemli performans farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Üç eğitim turu sonrası FedAvg yaklaşımında, uç nokta 1 yerel modeli %82,39, uç nokta 2 yerel modeli %82,04, uç nokta 3 yerel modeli %83,45 ve uç nokta 4 yerel modeli %83,10 doğruluk elde etmiştir. FedBest yaklaşımında ise uç nokta 1 yerel modeli %81,69, uç nokta 2 yerel modeli %83,45, uç nokta 3 yerel modeli %82,75 ve uç nokta 4 yerel modeli %82,75 doğruluk elde etmiştir. FedAvg yaklaşımında üç eğitim turu sonunda küresel model performansı %37,68'den %84,51'e yükselirken FedBest yaklaşımında ise %73,94'den %84,86'ya yükselmiştir.

FedBest yaklaşımı, BloodMNIST veri setinin sınıflandırılmasında yakınsama hızı ve genel performans açısından FedAvg'ye göre daha iyi performans göstermiştir. Her eğitim turu öncesi küresel model güncellemesi için sadece en iyi test doğruluğuna sahip uç noktanın yerel model parametreleri kullanıldığında, bir sonraki turda uç noktaların yerel model performansları test doğruluğu bakımından bir önceki tura göre genellikle daha iyi sonuç elde etmiştir.

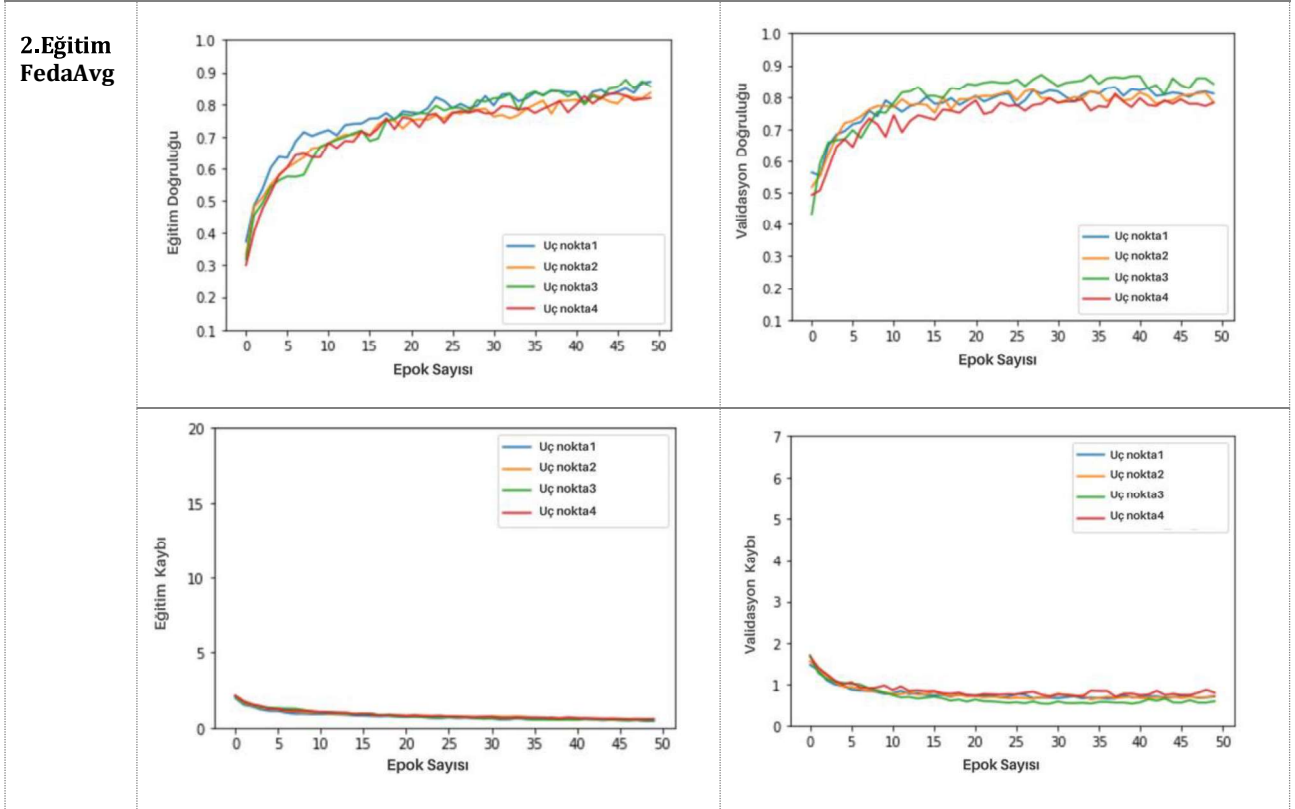
**Tablo 2.** BloodMNIST Veri Seti Deneysel Sonuçları

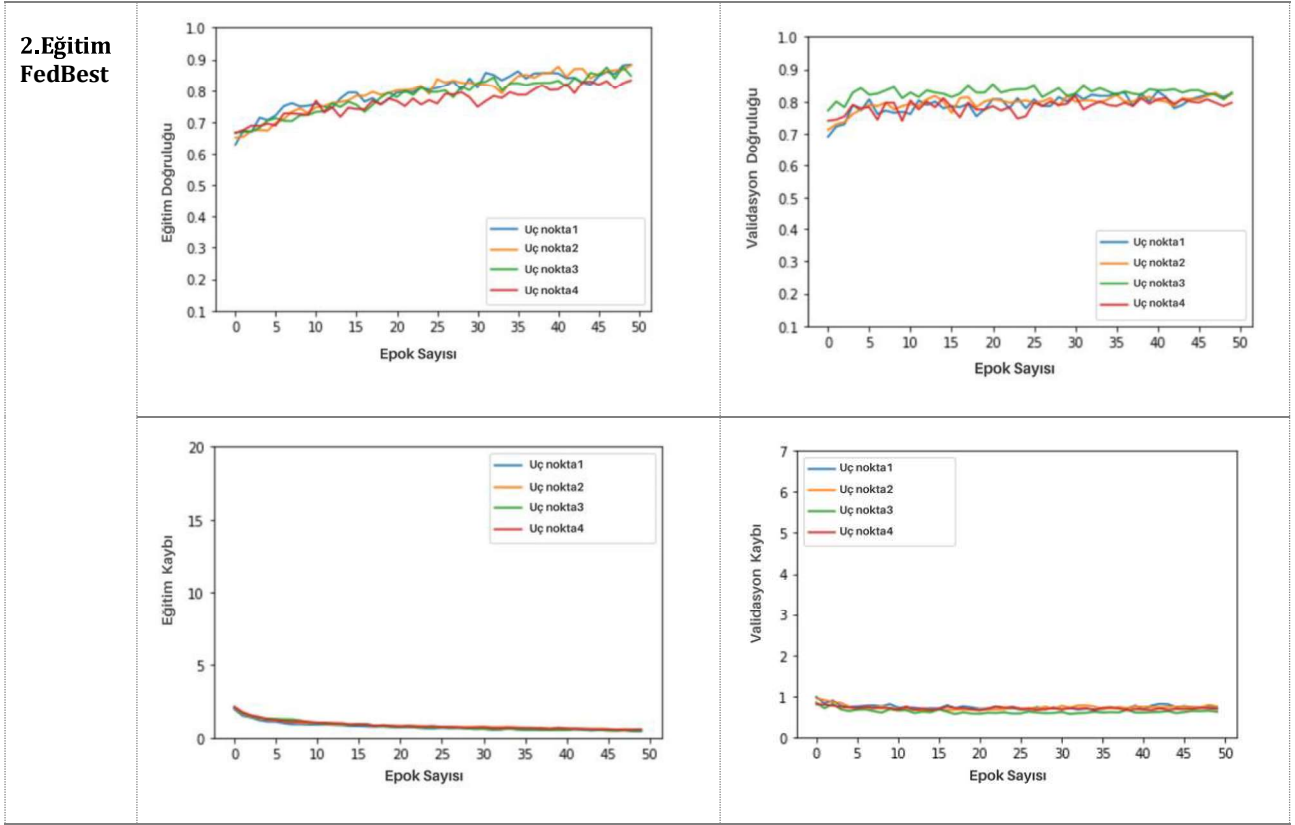
Uç noktalar		CNN Model	2. Eğitim FedAvg	2. Eğitim FedBest	3. Eğitim FedAvg	3. Eğitim FedBest
1	Train acc:	0.8464	0.8705	0.8835	0.8665	0.9127
	Test acc:	0.7711	0.8451	0.8275	0.8239	0.8169
2	Train acc:	0.7691	0.8343	0.8815	0.8685	0.8906
	Test acc:	0.7465	0.7711	0.8063	0.8204	0.8345
3	Train acc:	0.8183	0.8544	0.8484	0.8785	0.9016
	Test acc:	0.8134	0.8169	0.8134	0.8345	0.8275
4	Train acc:	0.7982	0.8183	0.8333	0.8765	0.8835
	Test acc:	0.7606	0.7923	0.8169	0.8310	0.8275
Küresel Model	Test acc:	FedAvg: 0.3768 FedBest: 0.7394	0.7570	0.8451	0.8451	0.8486

Şekil 5-7'de üç eğitim boyunca alınan uç noktalardaki yerel model performans sonuçlarının grafikleri sunulmaktadır. Grafikler, 50 epoch sonunda her uç noktanın yerel modelinin eğitim doğruluğu (train accuracy) ve kayıp değerlerini (train loss), ayrıca validasyon doğruluğu (validation accuracy) ve kayıp değerlerini (validation loss) göstermektedir. Grafikler, her uç noktanın eğitim sürecindeki performansını ve yerel modelin doğruluğu ile kayıp üzerindeki değişimleri takip etmemize olanak sağlamaktadır. Şekil 5'te ilk eğitim turu için merkezi sunucudan her uç noktaya gönderilen başlangıç CNN modelinin, uç noktalardaki yerel verilerle eğitim performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde, her bir uç noktanın yerel model performansı eğitim sürecinin başlangıcında eğitim ve validasyon doğruluğu için düşük bir değerde başladığını ancak yerel modellerin 50 epok sonunda eğitim ve validasyon performanslarının arttığını göstermiştir. Eğitim ve validasyon kayıp grafiklerinde ise başlangıçta yüksek bir kayıp değeri vardır, ancak eğitim turu sonuna doğru kayıp değeri düşmüştür. Bu kayıp grafiğindeki düşüş, modelin genel performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Şekil 6'da ilk eğitim turunda eğitilen yerel model parametreleri merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile güncellenen yeni küresel modelin, uç noktalardaki yerel verilerle ikinci eğitim turu performans sonuçlarının grafikleri bulunmaktadır. İkinci eğitim turu öncesi merkezi sunucuda güncellenen küresel model, ilk eğitim turundaki başlangıç CNN modelin, eğitim ve validasyon başlangıç doğruluk değerlerine göre her iki yaklaşımda da daha yüksek değer ile başladığı görülmüştür. Özellikle FedBest yaklaşımı, başlangıç değerlerinin FedAvg'ye göre daha yüksek değerde başladığı grafiklerde gösterilmiştir. Bu durum, ikinci eğitim turu için uç noktalara gönderilen küresel modelin, ilk eğitim turundaki başlangıç CNN modeline kıyasla, federe öğrenme yaklaşımlarıyla güncellenerek küresel model performansının geliştiğini göstermektedir. Şekil 7'de ise ikinci eğitim turunda eğitilen yerel modellerin merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile küresel modeli güncellenmesi sonucunda elde edilen yeni küresel modelin, her bir uç noktaya tekrar gönderilip eğitime başlandığında, yerel model başlangıç performanslarının bir önceki tura göre daha yüksek başlangıç değerle eğitime başladığı görülmüştür. Üçüncü eğitim turu sonunda, model performansının belirli bir seviyeye ulaştığı ve değişiminin sabitlendiği gözlenmiş ve üçüncü eğitim turunda federe öğrenme süreci tamamlanmıştır.

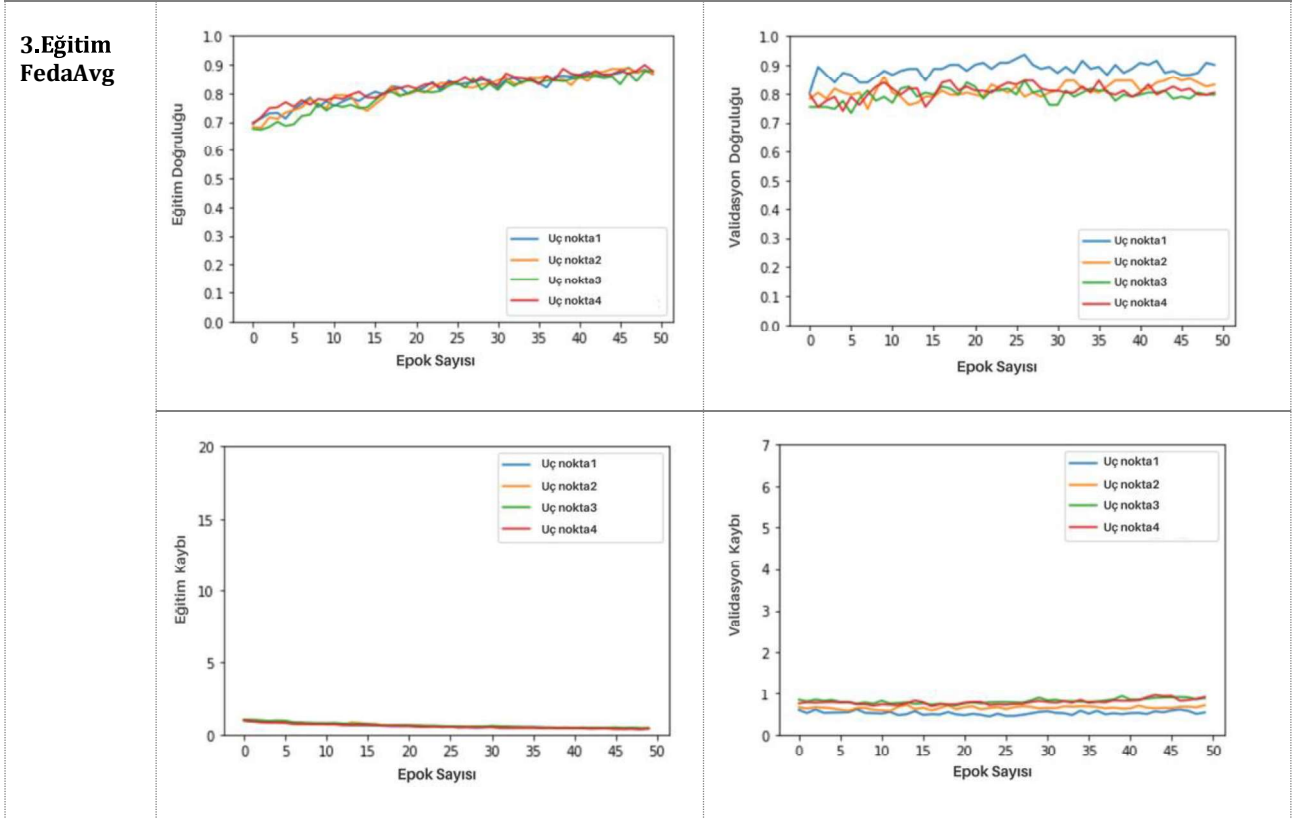


**Şekil 5.** Birinci eğitim sonunda BloodMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri; x eksenini, epok sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kaybı (Train/Validation loss) değerlerini göstermektedir.

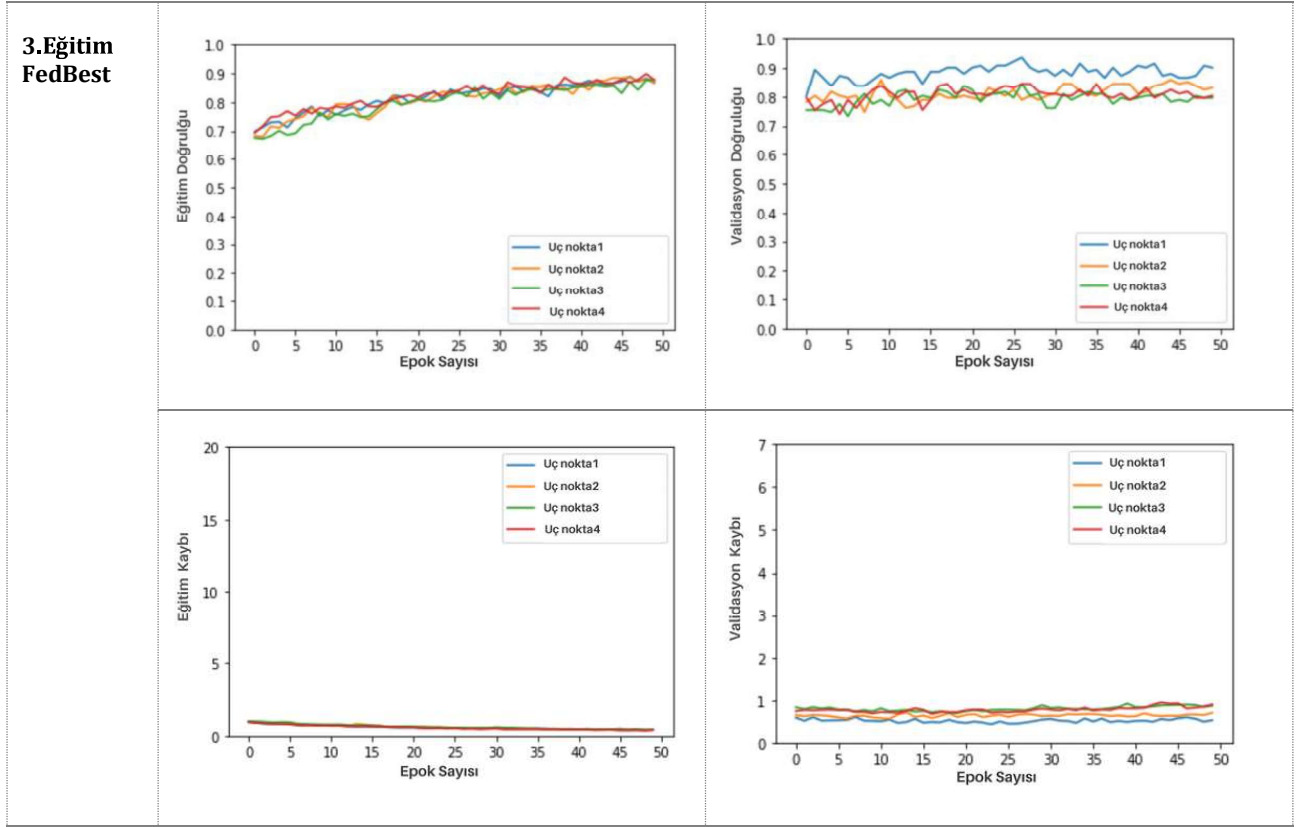




**Şekil 6.** İkinci eğitim sonunda BloodMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri; x eksenini, epok sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/ Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kaybı (Train/ Validation loss) değerlerini göstermektedir.

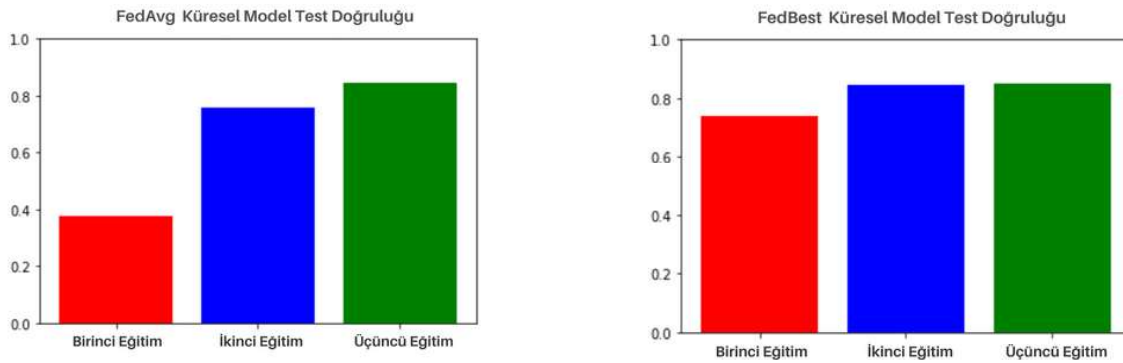






**Şekil 7.** Üçüncü eğitim sonunda BloodMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri; x eksenini, epoch sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kayıp (Train/Validation loss) değerlerini göstermektedir.

Şekil 8'de Tablo 1'de son satırda belirtilen her üç eğitim turu sonunda merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımlarıyla güncellenen küresel modelin test doğruluk sonuçlarının çubuk grafikleri sunulmuştur. FedAvg yaklaşımı kullanarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %37,68, ikinci eğitim turunda %75,70, üçüncü eğitim turunda %84,51 değerinde model test doğruluğu performansı göstermiştir. FedBest yaklaşımı kullanılarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %73,94, ikinci eğitim turunda %84,51, üçüncü eğitim turunda %84,86 değerlerinde model test doğruluğu performansı göstermiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere FedBest yaklaşımı FedAvg'ye göre küresel model test doğruluğu bakımından daha hızlı yakınsama elde etmiştir.



**Şekil 8.** BloodMNIST veri seti her eğitim turu sonu FedAvg ve FedBest yaklaşımlarıyla elde edilen küresel model performansları.

### 3.2.2. PathMNIST Veri Seti Deney Sonuçları

PathMNIST veri seti için FedAvg ve FedBest yaklaşımlarına ait üç eğitim turundaki sınıflandırma sonuçları Tablo 3'te sunulmaktadır. Buna göre, tüm uç noktaların yerel model doğrulukları üç eğitim turu sonunda daha yüksek doğruluk değerlerine ulaşmıştır. FedAvg yaklaşımı kullanılarak eğitilen küresel modelin üç eğitim turu sonunda küresel model test doğruluğunun %79,93 doğruluk verdiğini, FedBest yaklaşımında ise küresel modelin %74,08 test doğruluğu verdiği görülmektedir. Bu değerler, küresel modelin doğruluğunu geliştirmede her iki yaklaşımında etkinliğini göstermektedir. FedAvg ve FedBest yaklaşımlarında, uç noktaların yerel model doğruluk değerleri üç eğitim turu gerçekleşikten sonra incelendiğinde, FedAvg yaklaşımında, uç nokta 1 yerel modeli %69,40, uç nokta 2 yerel modeli %71,74, uç nokta 3 yerel modeli %70,23 ve uç nokta 4 yerel modeli %72,07 doğruluk elde etmiştir. FedBest yaklaşımında ise uç nokta 1 yerel modeli %81,69, uç nokta 2 yerel modeli %83,45, uç nokta 3 yerel modeli %82,75 ve uç nokta 4 yerel modeli %82,75 doğruluk elde etmiştir. FedAvg yaklaşımında üç eğitim turu sonunda küresel model performansı %14,05'ten %79,93'e yükselirken, FedBest yaklaşımında ise %68,06'dan %74,08'e yükselmiştir.

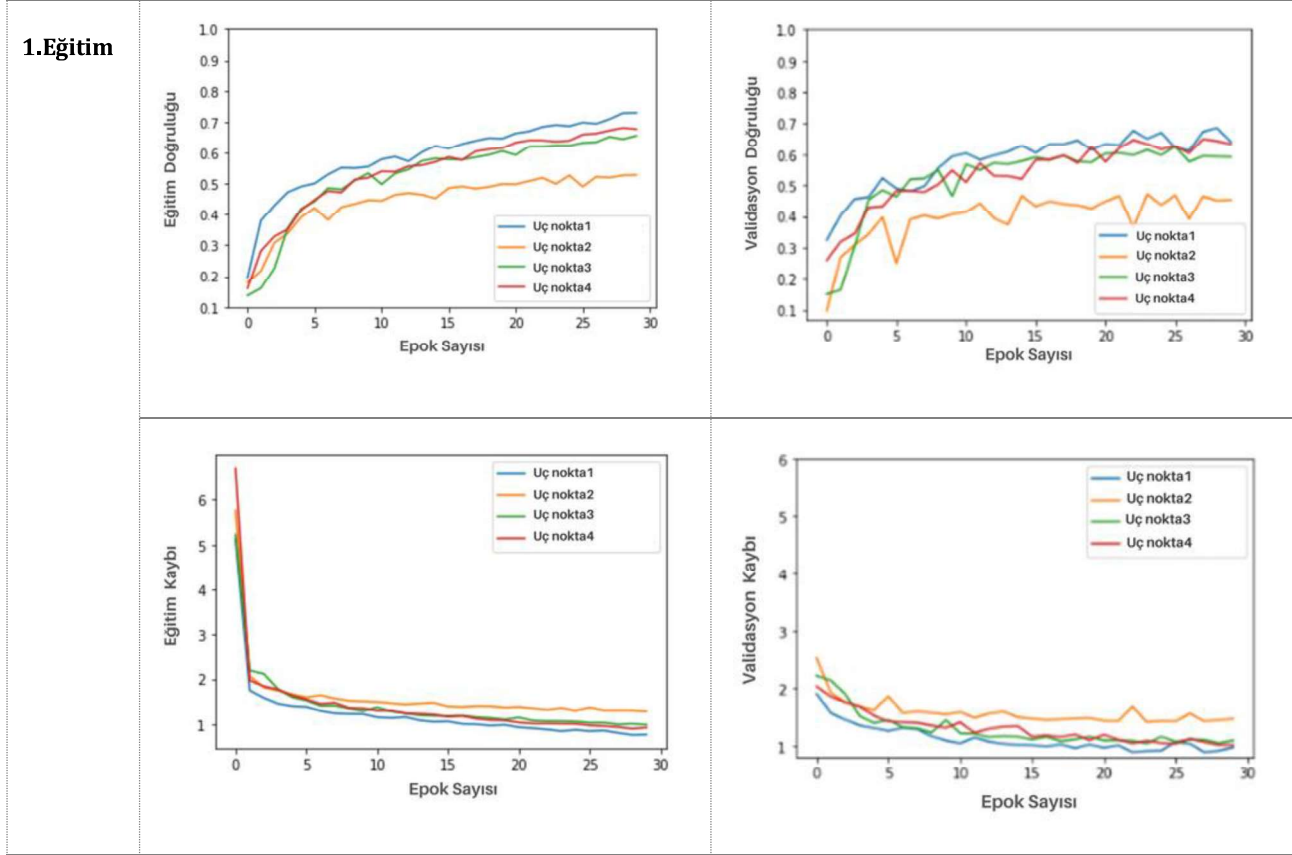
FedBest yaklaşımı PathMNIST veri setinin sınıflandırılmasında FedAvg'ye göre daha hızlı bir yakınsama elde etmiş olsa da üçüncü eğitim sonunda FedAvg yaklaşımı kullanılarak eğitilen küresel model test doğruluğu daha iyi sonuç vermiştir. Küresel model güncellemesinde sadece en iyi test doğruluğuna sahip yerel modelin parametreleri kullanıldığında bir sonraki turlarda uç noktaların yerel model test doğruluğu performanslarında genel anlamda bir önceki tura göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 3.** PathMNIST Veri Seti Deney Sonuçları

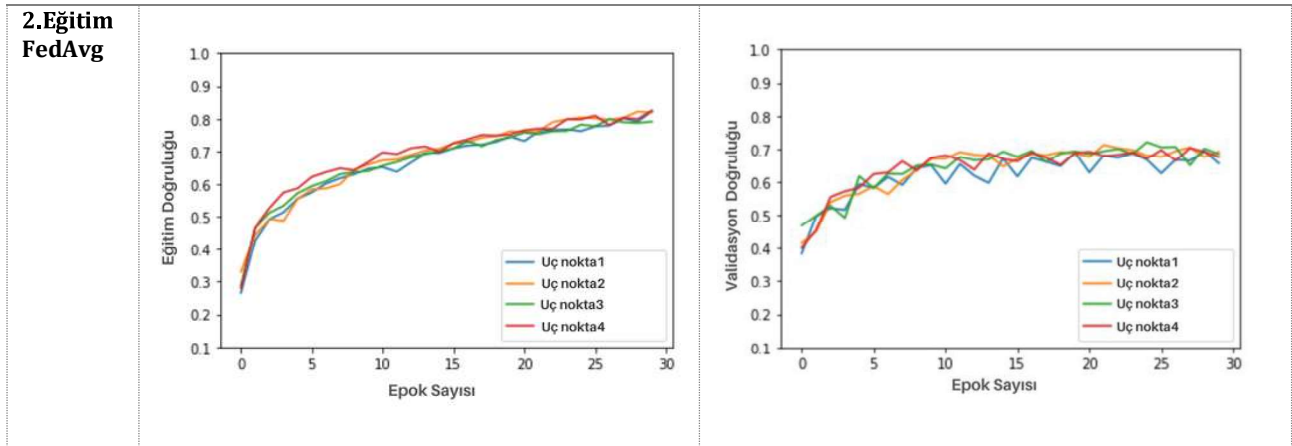
Uç noktalar	CNN Model	2. Eğitim FedAvg	2. Eğitim FedBest	3. Eğitim FedAvg	3. Eğitim FedBest
1	Train acc:	0.7289	0.8222	0.8065	0.9075
	Test acc:	0.6388	0.6656	0.7993	0.6940
2	Train acc:	0.5279	0.8182	0.8121	0.8995
	Test acc:	0.5635	0.6756	0.7609	0.7174
3	Train acc:	0.6554	0.7906	0.8092	0.8903
	Test acc:	0.6739	0.7375	0.6973	0.7023
4	Train acc:	0.6765	0.8252	0.7825	0.8848
	Test acc:	0.6756	0.6823	0.6890	0.7207
Küresel Model	Test acc:	FedAvg : 0.1405 FedBest: 0.6806	0.6221	0.7074	0.7993

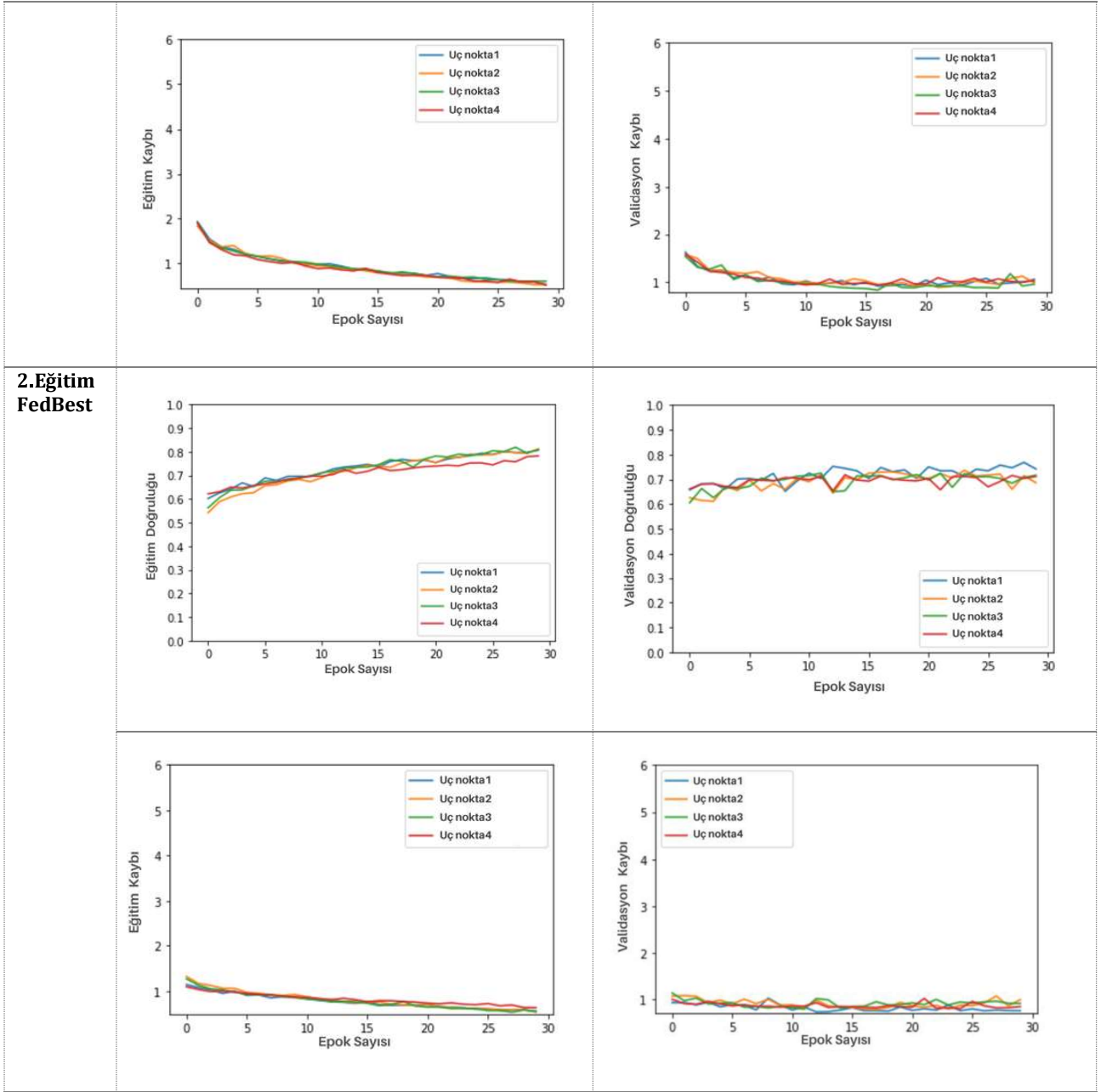
Şekil 9-11'de üç eğitim boyunca alınan uç noktalardaki yerel model performans sonuçlarının grafikleri sunulmaktadır. Grafikler, gösterilen 30 epoch sonunda her uç noktanın yerel modelinin eğitim doğruluğu (train accuracy) ve kayıp değerlerini (train loss), ayrıca validasyon doğruluğu (validation accuracy) ve kayıp değerlerini (validation loss) göstermektedir. Grafikler, her uç noktanın eğitim sürecindeki performansını ve yerel modelin doğruluğu ile kayıp üzerindeki değişimleri takip etmemize olanak sağlamaktadır. Şekil 5'te ilk eğitim turu için merkezi sunucudan her uç noktaya gönderilen başlangıç CNN modelinin, uç noktalardaki yerel verilerle eğitim performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. Şekil 9'daki grafikler incelendiğinde, her bir uç noktanın yerel model performansı eğitim sürecinin başlangıcında eğitim ve validasyon doğruluğu için düşük bir değerde başladığını ancak yerel modellerin 30 epok sonunda eğitim ve validasyon performanslarının arttığını göstermiştir. Eğitim ve validasyon kayıp grafiklerinde ise başlangıçta yüksek bir kayıp değeri vardır, ancak eğitim turu sonuna doğru kayıp değeri düşmüştür. Bu kayıp grafiğindeki düşüş, modelin genel performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Şekil 10'da ilk eğitim turunda eğitilen yerel model parametreleri merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile güncellenen yeni küresel modelin, uç noktalardaki yerel verilerle ikinci eğitim turu performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. İkinci eğitim turu öncesi merkezi sunucuda güncellenen küresel model, ilk eğitim turundaki başlangıç CNN modelin, eğitim ve validasyon başlangıç doğruluk değerlerine göre her iki yaklaşımda da daha yüksek değer ile başladığı görülmüştür. Özellikle FedBest yaklaşımı, başlangıç değerlerinin FedAvg'ye göre daha yüksek değerde başladığı grafiklerde gösterilmiştir. Bu durum, ikinci eğitim turu için uç

noktalara gönderilen küresel modelin, ilk eğitim turundaki başlangıç CNN modeline kıyasla, federe öğrenme yaklaşımlarıyla güncellenerek küresel model performansının geliştiğini göstermektedir. Şekil 11'de ise ikinci eğitim turunda eğitilen yerel modellerin merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile küresel modeli güncellenmesi sonucunda elde edilen yeni küresel modelin her bir uç noktaya tekrar gönderilip eğitime başlandığında, yerel model başlangıç performanslarının bir önceki tura göre daha yüksek başlangıç değerle eğitime başladığı görülmüştür. Üçüncü eğitim turu sonunda, model performansının belirli bir seviyeye ulaştığı ve değişiminin sabitlendiği gözlenmiş ve üçüncü eğitim turunda federe öğrenme süreci tamamlanmıştır.

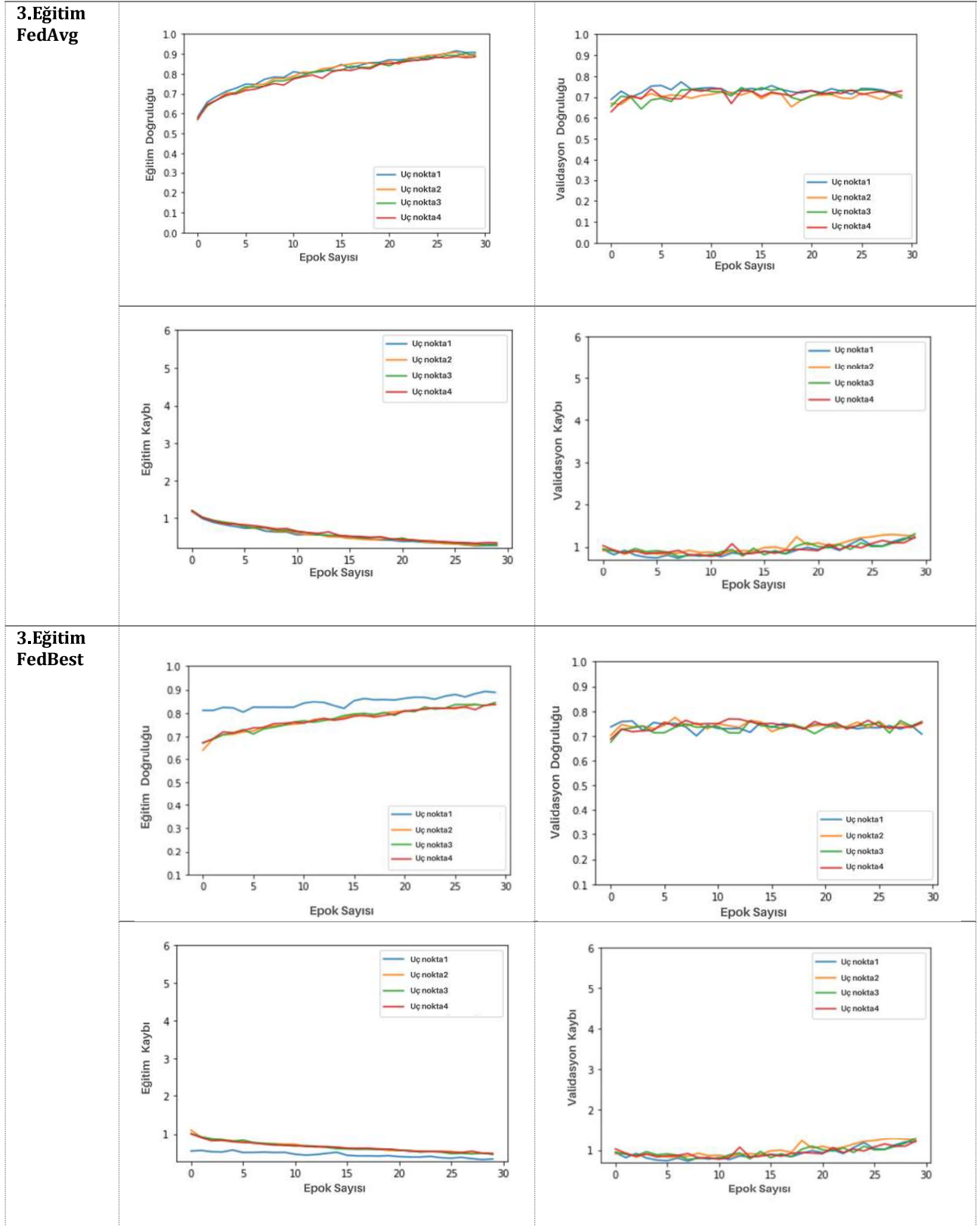


**Şekil 9.** Birinci eğitim sonu PathMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri; x eksenini, epoch sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kaybı (Train/Validation loss) değerlerini göstermektedir.





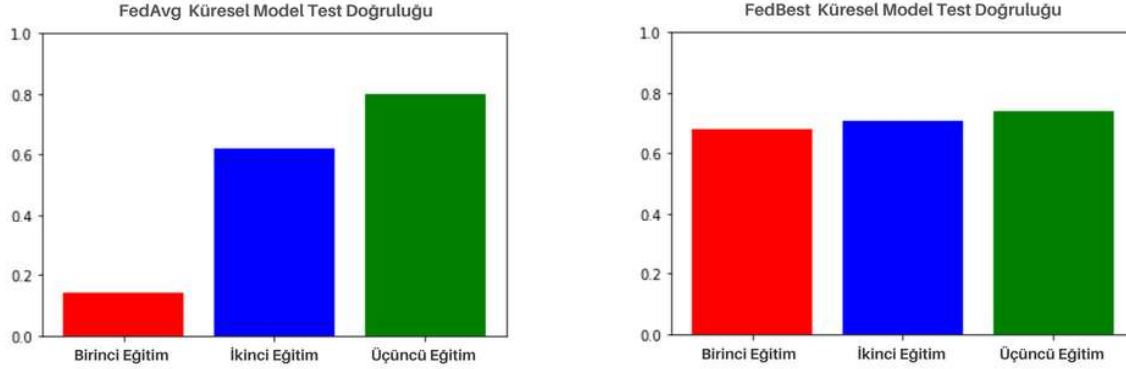
**Şekil 10.** İkinci eğitim sonu PathMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri;x eksenı, epoch sayısını, y eksenı ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kaybı (Train/Validation loss) değerlerini göstermektedir.



**Şekil 11.** Üçüncü eğitim sonu PathMNIST veri seti için bulunan sonuçların grafikleri;x eksenini, epoch sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kayıp (Train/Validation loss) değerlerini göstermektedir.

Şekil 12'de üç eğitim turu sonunda alınan FedAvg ve FedBest küresel model test doğruluğunun sonuçlarının bar grafikleri sunulmuştur. FedAvg yaklaşımı kullanarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %14,05, ikinci eğitim turunda %62,21, üçüncü eğitim turunda %79,93 değerinde model test doğruluğu performansı göstermiştir. FedBest yaklaşımı kullanılarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %68,06, ikinci eğitim turunda %70,74, üçüncü eğitim turunda %74,08 değerlerinde model test doğruluğu

performansı göstermiştir. Şekil 12’de görüldüğü üzere FedBest yaklaşımı FedAvg’ye göre model doğruluğu bakımından daha hızlı yakınsama elde etsede FedAvg yaklaşımı ile güncellenen küresel model üçüncü eğitim sonunda daha iyi test doğruluğuna ulaşmıştır.



Şekil 12. PathMNIST veri seti her eğitim turu sonu FedAvg ve FedBest yaklaşımlarıyla elde edilen küresel model performansları.

### 3.2.3. DermaMNIST Veri Seti Deney Sonuçları

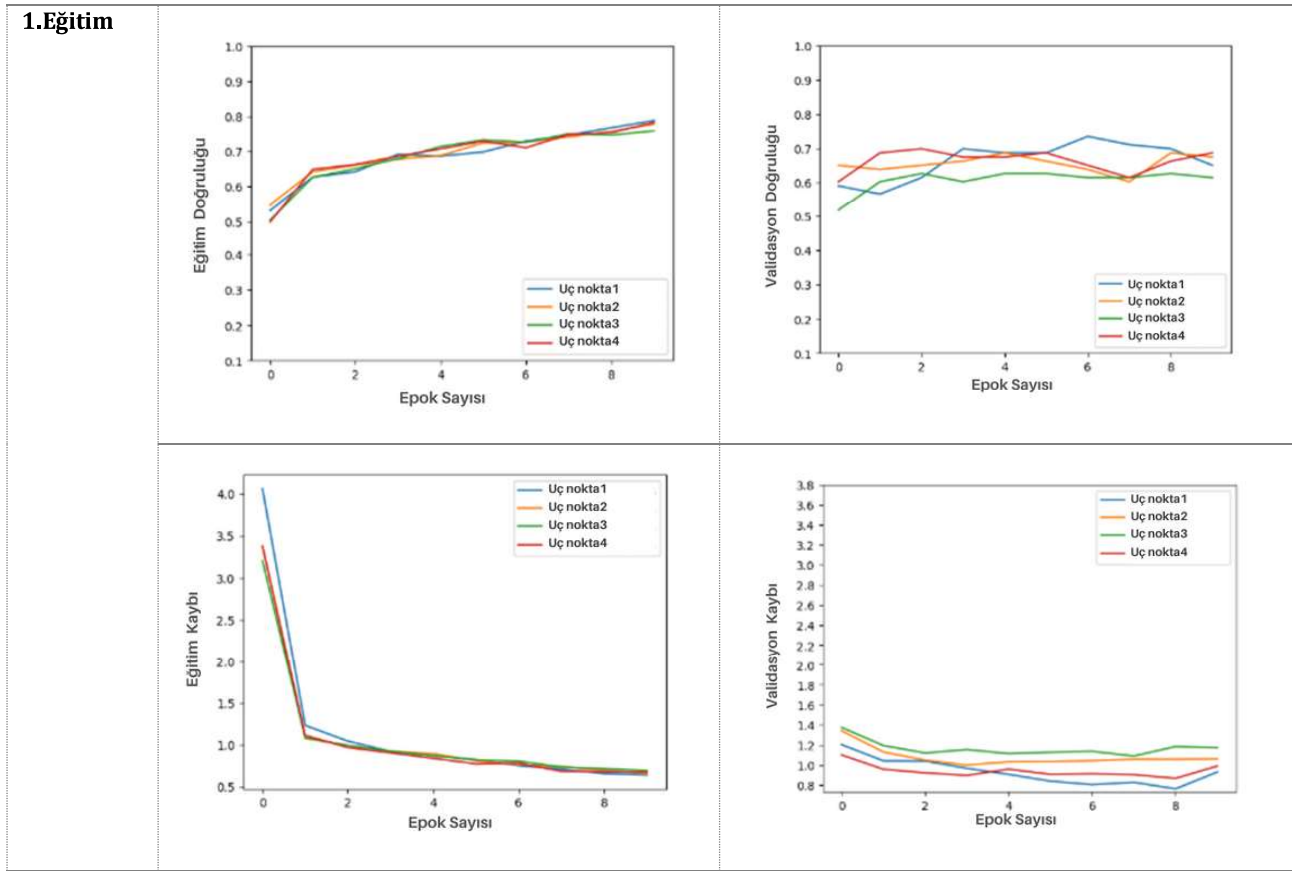
Tablo 4, DermaMNIST veri seti için FedAvg ve FedBest yaklaşımlarına ait üç eğitim turundaki sınıflandırma sonuçlarını sunmaktadır. Tablo 4’teki sonuçlar, tüm uç noktaların yerel model üç eğitim turu sonunda ilk tura göre daha yüksek doğruluk değerlerine ulaştığını göstermektedir. FedAvg yaklaşımı kullanılarak eğitilen küresel modelin test doğruluğunun %71,86 doğruluk verdiğini, FedBest yaklaşımında ise küresel modelin %73,05 test doğruluğu verdiğini görülmektedir. Bu değerler, modelin doğruluğunu geliştirmede her iki yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. FedAvg ve FedBest yaklaşımlarında, uç noktaların doğruluk değerleri üç eğitim turu gerçekleştikten sonra incelendiğinde; FedAvg yaklaşımında, uç nokta 1 yerel modeli %67,66, uç nokta 2 yerel modeli %69,46, uç nokta 3 yerel modeli %61,08 ve uç nokta 4 yerel modeli %64,67 doğruluk elde etmiştir. FedBest yaklaşımında ise uç nokta 1 yerel modeli %72,46, uç nokta 2 yerel modeli %68,86, uç nokta 3 yerel modeli %59,28 ve uç nokta 4 yerel modeli %70,66 doğruluk elde etmiştir. FedAvg yaklaşımında üç eğitim turu sonunda küresel model performansı %67,07’den %71,86’ya yükselirken, FedBest yaklaşımında ise %68,26’dan %73,05’e yükselmiştir.

FedBest yaklaşımı ile DermaMNIST veri setinin sınıflandırmasında FedAvg’ye göre daha hızlı bir yakınsama elde etmiş ve DermaMNIST veri seti sınıflandırmasında küresel model test doğruluğu için daha iyi sonuç vermiştir. Küresel model güncellemesinde sadece en iyi test doğruluğuna sahip yerel model kullanıldığında bir sonraki turlarda yerel modellerin test doğruluğunda genelde bir önceki tura göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. DermaMNIST Veri Seti Deney Sonuçları

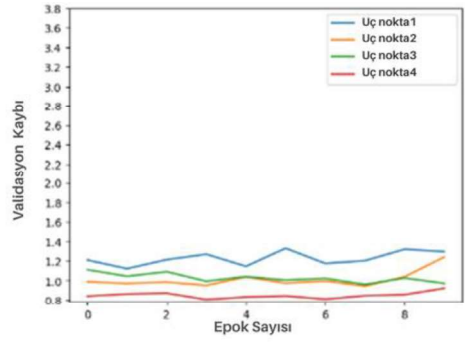
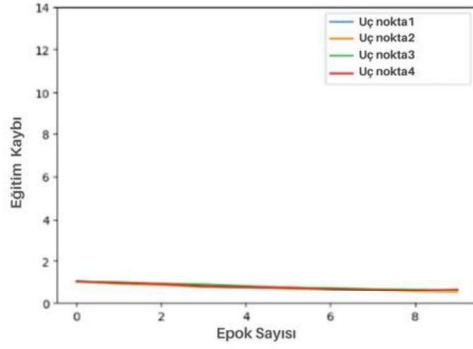
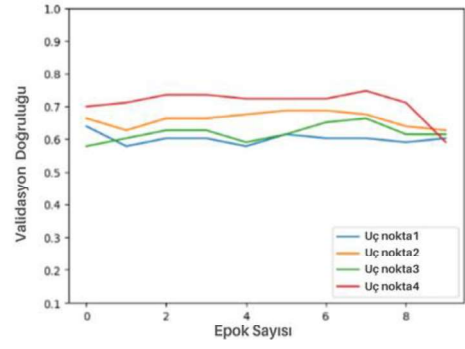
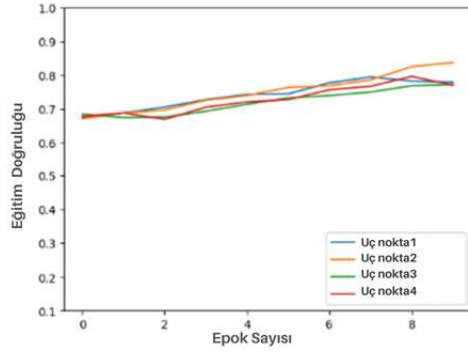
Uç noktalar	CNN Model	2. Eğitim FedAvg	2. Eğitim FedBest	3. Eğitim FedAvg	3. Eğitim FedBest
1	Train acc:	0.7873	0.7787	0.7993	0.7513
	Test acc:	0.6766	0.6766	0.6168	0.6766
2	Train acc:	0.7770	0.8370	0.8268	0.7788
	Test acc:	0.6766	0.6766	0.6407	0.6946
3	Train acc:	0.7581	0.7719	0.8062	0.8316
	Test acc:	0.6766	0.6527	0.6826	0.6108
4	Train acc:	0.7822	0.7702	0.7890	0.7959
	Test acc:	0.7186	0.6228	0.6647	0.6467
Küresel Model	Test acc:	FedAvg: 0.6707 FedBest: 0.6826	0.6946	0.7186	0.7186

Şekil 13-15'te üç eğitim turu boyunca alınan uç noktadaki yerel model performans sonuçlarının grafikleri sunulmaktadır. Grafikler, gösterilen 10 epoch sonunda her uç noktanın yerel modelinin eğitim doğruluğu (train accuracy) ve kayıp değerlerini (train loss), ayrıca validasyon doğruluğu (validation accuracy) ve kayıp değerlerini (validation loss) göstermektedir. Şekil 13'te ilk eğitim turu için merkezi sunucudan her uç noktaya gönderilen başlangıç CNN modelinin, uç noktalardaki yerel verilerle eğitim performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. Şekil 14'te ilk eğitim turunda eğitilen yerel model parametreleri merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile güncellenen yeni küresel modelin, uç noktalardaki yerel verilerle ikinci eğitim turu performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. Şekil 15'te ise ikinci eğitim turunda eğitilen yerel modellerin merkezi sunucuda FedAvg ve FedBest yaklaşımları ile küresel modeli güncellenmesi sonucunda elde edilen yeni küresel modelin, uç noktalardaki yerel verilerle üçüncü eğitim turu performans sonuçları grafikleri bulunmaktadır. Üçüncü eğitim turu sonunda, model performansının belirli bir seviyeye ulaştığı ve değişiminin sabitlendiği gözlenmiş ve üçüncü eğitim turunda federe öğrenme süreci tamamlanmıştır.

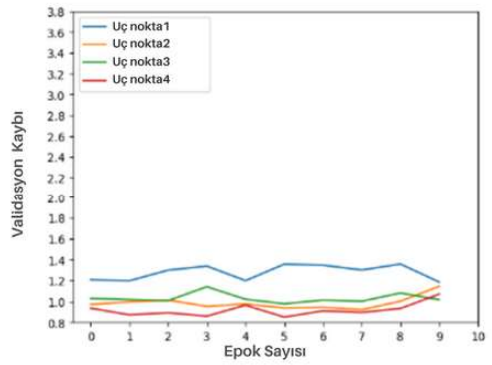
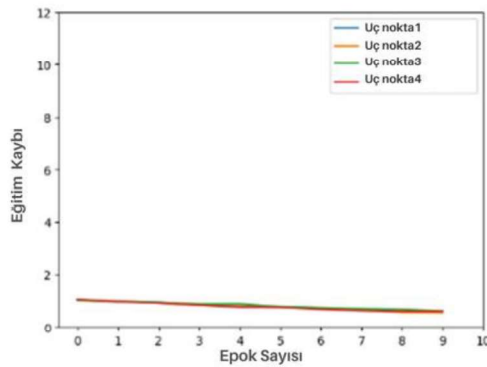
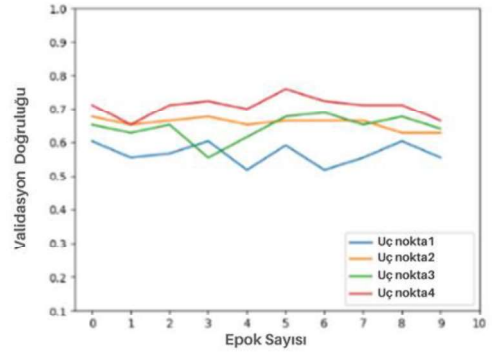
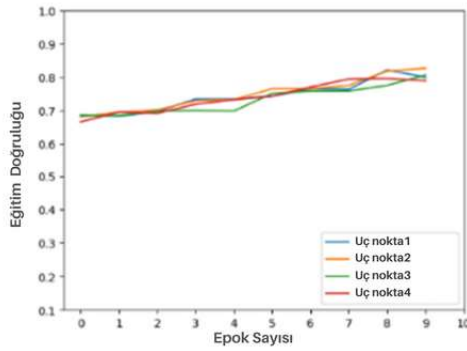


**Şekil 13.** Birinci eğitim sonu DermaMNIST veri seti deney sonuçları grafikleri; x eksenini, epoch sayısını, y eksenini ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/ Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kayıp (Train/ Validation loss) değerlerini göstermektedir.

2.Eğitim FedAvg



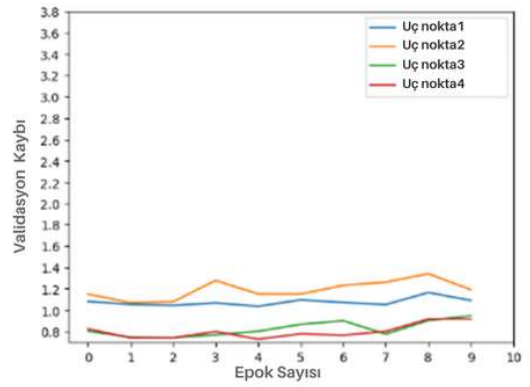
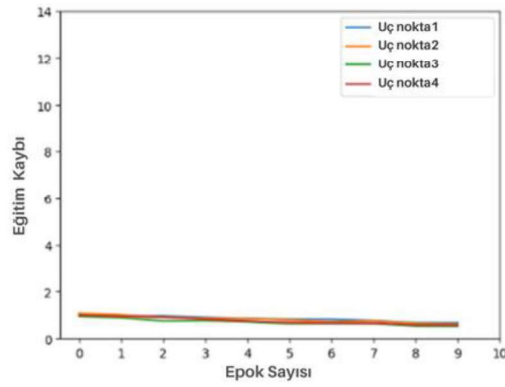
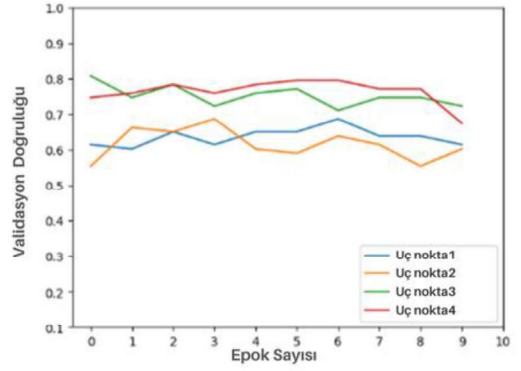
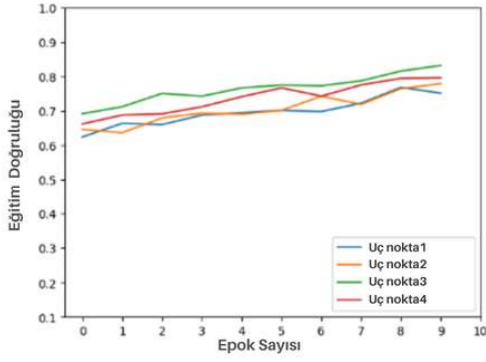
2.Eğitim FedBest



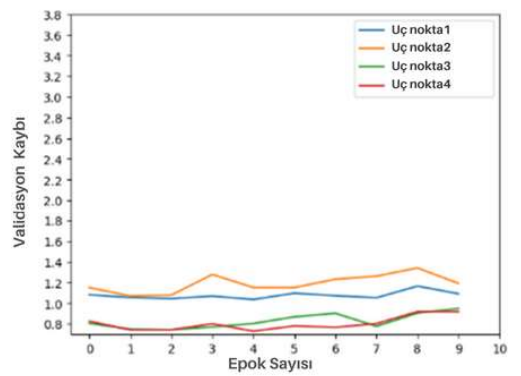
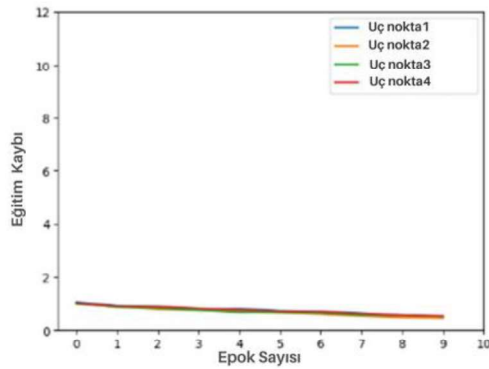
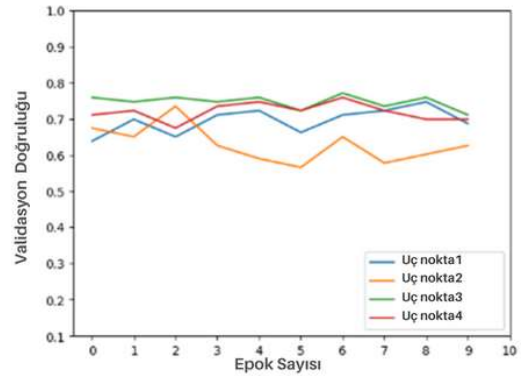
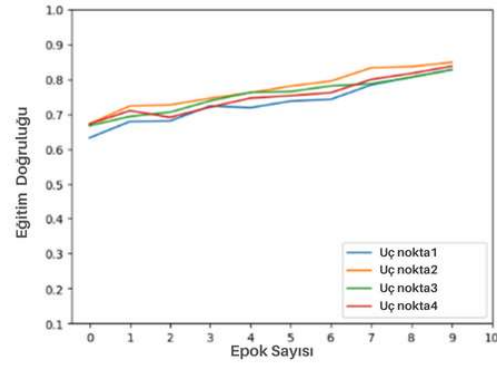
Şekil 14. İkinci eğitim sonu DermaMNIST veri seti deney sonuçları grafikleri; x eksen, epoch sayısını, y eksen ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/ Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kaybı (Train/ Validation loss) değerlerini göstermektedir.



**3. Eğitim FedAvg**

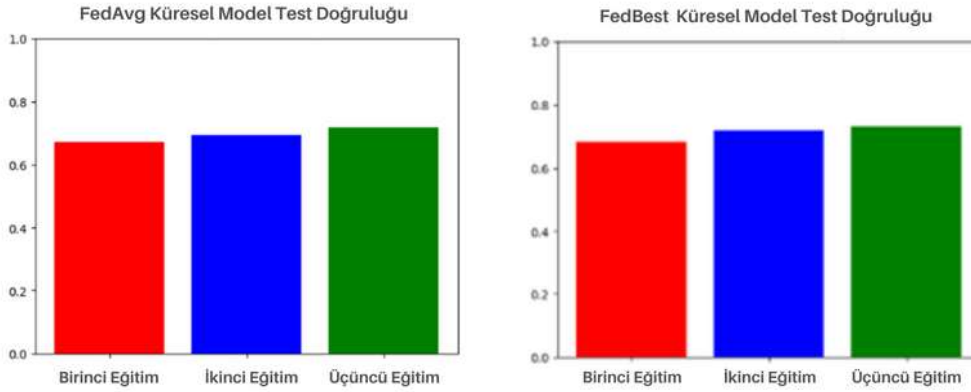


**3. Eğitim FedBest**



**Şekil 15.** Üçüncü eğitim sonu DermaMNIST veri seti deney sonuçları grafikleri; x eksen, epoch sayısını, y eksen ise eğitim sırasında elde edilen Eğitim/Validasyon doğruluk (Train/ Validation accuracy) ve Eğitim/Validasyon kayıp (Train/ Validation loss) değerlerini göstermektedir.

Şekil 16'da üç eğitim turu sonunda alınan FedAvg ve FedBest sonuçların grafikleri sunulmuştur. FedAvg yaklaşımı kullanarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %67,07, ikinci eğitim turunda %69,46, üçüncü eğitim turunda %71,86 değerinde model test doğruluğu performansı göstermiştir. FedBest yaklaşımı kullanılarak güncellenen küresel model performansı ilk eğitim turunda %68,26, ikinci eğitim turunda %71,86, üçüncü eğitim turunda %73,05 değerlerinde model test doğruluğu performansı göstermiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere FedBest yaklaşımı kullanılarak güncellenen küresel model test doğruluğunun FedAvg yaklaşımına göre model test doğruluğu daha hızlı yakınsama elde etmiş ve daha iyi performans göstermiştir.



**Şekil 16.** DermaMNIST veri seti her eğitim turu sonu FedAvg ve FedBest yaklaşımıyla elde edilen küresel model performansları.

Tablo 5'te, BloodMNIST, PathMNIST ve DermaMNIST tüm veri setleri için merkezi öğrenme yöntemiyle eğitilen CNN modelinin sonuçları, bu üç veri seti için uç noktalara dağıtılan verilerle eğitilen yerel modellerin ilk eğitim turunda elde edilen sonuçlarının ortalaması ve üç eğitim turunun sonunda alınan FedAvg ve FedBest sonuçları özetlenmiştir.

**Tablo 5.** Kullanılan Veri Setleri ve Deney Sonuçları

Veri Setleri	CNN (Tüm veri)	CNN (Ortalama)	FedAvg	FedBest
<b>BloodMNIST</b>	<b>Test acc:</b> 0.9211	<b>Test acc:</b> 0.7729	<b>Test acc:</b> 0.8451	<b>Test acc:</b> 0.8486
<b>PathMNIST</b>	<b>Test acc:</b> 0.7926	<b>Test acc:</b> 0.6379	<b>Test acc:</b> 0.7993	<b>Test acc:</b> 0.7408
<b>DermaMNIST</b>	<b>Test acc:</b> 0.7365	<b>Test acc:</b> 0.6871	<b>Test acc:</b> 0.7186	<b>Test acc:</b> 0.7305

Tablo 5'e göre üç farklı veri seti üzerinde yapılan deneyler sonucunda, BloodMNIST veri setinin uç noktalara dağıtılmadan önceki tüm eğitim veri seti kullanılarak eğitilen CNN model için test doğruluğu yaklaşık %92,11 olarak hesaplanmıştır. Federe Öğrenme süreci öncesi tüm eğitim veri seti dört uç noktaya rastgele dağıtılmış ve rastgele dağıtılan eğitim verileri ile eğitilen yerel modellerin test doğrulukları hesaplanmış ve bu dört uç nokta yerel model test doğruluklarının sonuçlarının ortalaması alındığında CNN model test doğruluğu ortalaması %77,29 olarak hesaplanmıştır. Federe öğrenme süreci sonunda FedAvg yaklaşımı kullanılarak elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %77,29'dan başlayıp %84,51'e yükselmiştir. FedBest yaklaşımı ile elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %77,29'dan başlayıp %84,86'ya yükselmiştir.

PathMNIST veri setinin uç noktalara dağıtılmadan önceki tüm eğitim veri seti kullanılarak eğitilen CNN model için test doğruluğu yaklaşık %79,26 olarak hesaplanmıştır. Tüm eğitim veri seti dört uç noktaya rastgele dağıtılmış ve rastgele dağıtılan eğitim verileri ile eğitilen yerel modellerin test doğrulukları hesaplanmış ve bu dört uç nokta yerel model test doğruluklarının sonuçlarının ortalaması alındığında CNN model test doğruluğu ortalama %63,79 olarak hesaplanmıştır. Federe öğrenme süreci sonunda FedAvg yaklaşımı kullanılarak elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %63,79'dan başlayıp %79,93'e yükselmiştir. FedBest yaklaşımı ile elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %63,79'dan başlayıp %74,08'e yükselmiştir.

DermaMNIST veri setinin uç noktalara dağıtılmadan önceki tüm eğitim veri seti kullanılarak eğitilen CNN model için test doğruluğu yaklaşık %73,65 olarak hesaplanmıştır. Tüm eğitim veri seti dört uç noktaya rastgele dağıtılmış ve rastgele dağıtılan eğitim verileri ile eğitilen yerel modellerin test doğrulukları hesaplanmış ve bu dört uç nokta yerel model test doğruluklarının sonuçlarının ortalaması alındığında CNN model test doğruluğu ortalama %68,71 olarak hesaplanmıştır. Federe öğrenme süreci sonunda FedAvg yaklaşımı kullanılarak elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %68,71'den başlayıp %71,86'ya yükselmiştir. FedBest yaklaşımı ile elde edilen küresel modelin test doğruluğu CNN ortalama değer olan %68,71'den başlayıp %73,05'e yükselmiştir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, CNN derin öğrenme algoritması kullanarak medikal veri sınıflandırması için federe öğrenme yaklaşımlarından FedAvg ve önerilen FedBest algoritmalarının uygulaması araştırılmıştır. FedAvg algoritması, uç noktalardan gelen yerel modellerin parametrelerinin ortalamalarını alarak küresel modeli güncellemeyi içeren bir temel yaklaşım olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, verileri uç noktalarda tutarak her uç noktadan öğrenilen bilgileri birleştirmemize olanak sağlamıştır. Federe öğrenme sürecini daha da geliştirmek için FedBest algoritması kullanıma sunulmuştur. Bu algoritma, model güncellemesi için en yüksek model test doğruluğuna sahip uç noktanın yerel model parametrelerini kullanan bir yaklaşımdır. Sonuçlar, FedBest'in FedAvg'ye kıyasla BloodMNIST ve DermaMNIST için daha hızlı yakınsama ve yüksek doğruluk elde ettiğini ve önerilen algoritmanın medikal veri sınıflandırma için etkinliğini göstermiştir. PathMNIST veri seti için ise FedBest daha hızlı yakınsama sağlasada FedAvg yaklaşımı üç eğitim sonunda FedBest 'e göre küresel model test doğruluğunda daha iyi sonuç vermiştir.

Sonuçlar, en yüksek test doğruluğuna sahip yerel modelin katkıları daha fazla dikkate alındığında, küresel modelin daha hızlı yakınsayacağını ve daha iyi sınıflandırma yapabileceğini göstermiştir. FedBest'te her eğitim turu öncesi en iyi performansa sahip olan uç noktanın bilgisinin yanı sıra çeşitliliğin sağlanması bakımından bazı turlarda diğer uç noktalardan da faydalanılabilir. Bu nedenle, FedAvg ve FedBest gibi algoritmaların performansı, kullanıldıkları senaryoya, veri dağılımına, cihaz sayısına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Genel olarak, bu çalışma, medikal veri sınıflandırması için federe öğrenmenin potansiyelini ortaya koymuş ve sağlık hizmetleri uygulamalarında mahremiyeti koruma tekniklerinin önemini vurgulamıştır. Gelecekteki araştırmalar, federe öğrenme algoritmalarını daha da optimize etmeye ve bunların diğer medikal veri kümelerine ve sınıflandırma görevlerine uygulanabilirliğini keşfetmeye odaklanabilir.

#### Kaynakça

- [1] Büyüknacar, Yavuz Canbay-Yaşar. "Federe öğrenme ve veri mahremiyeti." Akademik Bilişim Konferansı. 2019.
- [2] Zhang, W., Zhou, T., Lu, Q., Wang, X., Zhu, C., Sun, H., ... & Wang, F. Y. (2021). Dynamic-fusion-based federated learning for COVID-19 detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(21), 15884-15891.
- [3] Odera, David. "Federated learning and differential privacy in clinical health: Extensive survey." (2023).
- [4] Sheller, M. J., Reina, G. A., Edwards, B., Martin, J., & Bakas, S. (2019). Multi-institutional deep learning modeling without sharing patient data: A feasibility study on brain tumor segmentation. In *Brainlesion: Glioma, Multiple Sclerosis, Stroke and Traumatic Brain Injuries: 4th International Workshop, BrainLes 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 16, 2018, Revised Selected Papers, Part I 4* (pp. 92-104). Springer International Publishing.

- [5] Yoo, J. H., Jeong, H., Lee, J., & Chung, T. M. (2022). Open problems in medical federated learning. *International Journal of Web Information Systems*, 18(2/3), 77-99.
- [6] Wibawa, F., Catak, F. O., Sarp, S., & Kuzlu, M. (2022). BFV-Based Homomorphic Encryption for Privacy-Preserving CNN Models. *Cryptography*, 6(3), 34.
- [7] Farhad, Arshad, Sandra I. Woolley, and Peter Andras. "A Preliminary Scoping Study of Federated Learning for the Internet of Medical Things." *Studies in Health Technology and Informatics* 281 (2021): 504-505.
- [8] Zhao, Leiyang, and Jianjun Huang. "A distribution information sharing federated learning approach for medical image data." *Complex & Intelligent Systems* (2023): 1-12.
- [9] Sohan, Md Fahimuzzman, and Anas Basalamah. "A Systematic Review on Federated Learning in Medical Image Analysis." *IEEE Access* (2023).
- [10] Yi, Hang, Tongxuan Bie, and Tongjiang Yan. "Framework Construction of an Adversarial Federated Transfer Learning Classifier." *arXiv preprint arXiv:2211.04734* (2022).
- [11] Nazir, Sajid, and Mohammad Kaleem. "Federated Learning for Medical Image Analysis with Deep Neural Networks." *Diagnostics* 13.9 (2023): 1532.
- [12] Brendan McMahan, Eider Moore, Daniel Ramage, Seth Hampson, and Blaise Aguera y Arcas, "Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data," in *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2017, 20-22 April 2017, Fort Lauderdale, FL, USA, Aarti Singh and Xiaojin (Jerry) Zhu, Eds. 2017, vol. 54 of Proceedings of Machine Learning Research*, pp. 1273–1282, PMLR.
- [13] Reza Shokri and Vitaly Shmatikov, "Privacy-preserving deep learning," in *Proceedings of the 22Nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, New York, NY, USA, 2015, CCS '15*, pp. 1310–1321, ACM.
- [14] Martin Abadi, Andy Chu, Ian Goodfellow, Brendan McMahan, Ilya Mironov, Kunal Talwar, and Li Zhang. Deep learning with differential privacy. In *23rd ACM Conference on Computer and Communications Security (ACM CCS)*, 2016.
- [15] McMahan, B., Moore, E., Ramage, D., Hampson, S., & y Arcas, B. A. (2017, April). Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data. In *Artificial intelligence and statistics* (pp. 1273-1282). PMLR.
- [16] Behavioral Informatics & Interaction Computation Lab (BIIC) <https://biic.ee.nthu.edu.tw/blog-detail.php?id=2> (Erişim Tarihi: 14.06.2023).
- [17] Lee, Hagyeong, and Jongwoo Song. "Introduction to convolutional neural network using Keras; an understanding from a statistician." *Communications for Statistical Applications and Methods* 26.6 (2019): 591-610.
- [18] Yang, J., Shi, R., Wei, D., Liu, Z., Zhao, L., Ke, B., ... & Ni, B. (2023). MedMNIST v2-A large-scale lightweight benchmark for 2D and 3D biomedical image classification. *Scientific Data*, 10(1), 41.