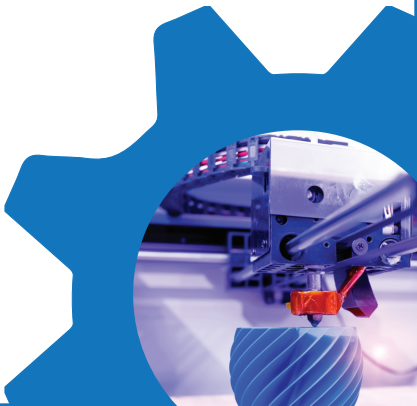


GAZI
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN - CHIEF

İsmail ŞAHİNGazi University, Ankara, Turkey
e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇEGazi University
e-mail: harungokce@yahoo.ca**Murat DÖRTERLER**Gazi University
e-mail: dorterler@gazi.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Adem TEKEREK

Gazi University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan Islami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Karadeniz Technical University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Herbert M. REYNOLDS

Michigan State University, USA

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

John KINUTHIA

University of South Wales, England

Jonathan C. BORG

University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY

University of Ontario Technology, Canada

Kürşad SEZER

Gazi University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

Shahin JALILI

Tebriz University, Iran

Şakir TAŞDEMİR

Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ

John Moores University, England

Yasir JOYA

GIK Institute, Pakistan

DİL EDITÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)**TEKNİK EDITÖR / TECHNICAL EDITOR****Neslihan TOP**

Gazi University

Nurullah YÜKSEL

Gazi University

e-mail: editorgjes@gmail.com**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Abdullah Tahir ŞENSOY

Adib HABBAL

Alaattin KAÇAL

Ali ATEŞ

Ali GÜNEN

Anıl ÖZDEMİR

Ayhan AYTAÇ

Barış ÖZLÜ (2 Adet)

Batuhan ÖZKAN

Bekir YALÇIN

Berna KİRAZ

Cemil OCAK

Cevdet Emin EKİNCİ

Çiğdem Belgin DİKMEN

Enes CENGİZ

Fatih ŞAHİN

Hilal CAN

İlker Ali OZKAN

İnan KESKİN

İsmail OVALI

Kemal AKYOL

Mehmet Ali KALAYLI

Mehmet DEMİRCİ

Mehmet ŞİMŞEK

Muhammed ELİTAŞ

Muhammed Mutlu YAPICI

Nihat Sinan IŞIK

Omar DAKKAK

Onur ALTUNTAŞ

Onur SARAN

Özer ZEYBEK

Şakir TASDEMİR

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Gözde ALTUNTAŞ

Gültekin UZUN

Hakan GÖKMEŞE

Harun KOÇAK

Hasan Hüseyin SAYAN

Hayrettin KARADÖL

Serap ÇAKAR

Serdar NESLİHANOĞLU

Şeref KESKİN

Yasin DUYSAK

Yiğit Ali ÜNCÜ

Yusuf SÖNMEZ

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

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık

Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara

Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312

e-mail: editorgjes@gmail.com

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- AISI 1050 ve D2 Soğuk İş Takım Çeliği Malzeme Üzerine Açılmış Deliklere Uygulanan Ezme İşleminin Yüzeysel Özelliklerine Etkisi
Effect of Burnishing Process on the Surface Properties of Drilled AISI 1050 and D2 Cold Work Tool Steel Materials
Tuncay SİMSEK, Alican YAKIN, Adnan AKKURT153-162
- Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlarda Moment Salınımlarını Azaltmak İçin Yeni Bir Yöntem: Slitli Stator Yapısı
An Approach for Reducing Torque Ripples on Permanent Magnet Synchronous Motors: Slitted Stator Core
Mehmet Murat TEZCAN, Asım Gökhan YETGİN.....163-173
- Evrişimli Sinir Ağı Kullanarak Tarımsal Görüntülerdeki Bozulmaları Sınıflandırma
Classification of Distortions in Agricultural Images Using Convolutional Neural Network
Şafak ALTAY AÇAR.....174-182
- Ulusal ve Uluslararası Standartlarda Üretilen Kompozit Binaların Karşılaştırmalı Analizi
Comparative Analysis of Composite Buildings Produced in National and International Standards
Serkan ETLİ, Melek AKGÜL.....183-199
- Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile El Yazısından Kişilik Özelliklerinin Tespiti
Detection of Personality Features From Handwriting By Machine Learning Methods
Hilal MÜSEVİTOĞLU, Ali ÖZTÜRK, Fatma Nur BAŞÜNA.....200-212
- Eriyik Yığılma Modellemeye Dayalı 3B Baskılı PLA ve Tok PLA Malzemelerinin Aşınma Özelliklerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi
Experimentally Assessing the Wear Characteristics of 3D-Printed PLA and Tough PLA Materials Based on Fused Deposition Modeling
Engin TAN.....213-226
- MANET'lerde Hareketliliğin AODV, DSR ve DSDV Protokollerinin Performansına Etkisi
The Effect of Mobility in MANET on the Performance of AODV, DSR and DSDV Protocols
Abdullah ORMAN, Hamza Aytaç DOĞANAY, Murat DENER.....227-237
- Biyomedikal Görüntülerde Temel Kapsül Ağ Mimarisinin Sınıflandırma Performansının İncelenmesi
Performance Evaluation Of Basic Capsule Network Architecture In The Classification Of Biomedical Images
Sümeysra Büşra ŞENGÜL, İlker Ali ÖZKAN.....238-247
- Geliştirilen Dağıtılmış Makine Öğrenimi Modellerinin Blok Zincirde Depolanması
Storage of Developed Distributed Machine Learning Models on Blockchain
Remzi GÜRFİDAN, Mevlüt ERSOY248-263
- Antisimetrik Fiber Metal Laminat Plakaların Titreşim Davranışları
Vibration Behaviors of Antisymmetric Fiber Metal Laminated Composite Plates
Sinan MARAŞ, Mustafa YAMAN.....264-276
- Farklı Örgü Tiplerindeki Çelik Çatı Makaslarının AISC360-16 Yönetmeliğine Göre Değerlendirilmesi
Evaluation of Different Mesh Types of Steel Roof Trusses According to AISC360-16 Code

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

- Hilmi ARISOY, Gunnur YAVUZ**.....277-290
- Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Yapılarda Dolgu Geometrisi ve Gözenek Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi
The Effects of Infill Geometry and Porosity Ratio on Mechanical Properties of PLA Structures Produced by Additive Manufacturing
Rukiye YEŞİLOĞLU, Ramazan ÖZMEN, Mustafa GÜNAY.....291-303
- Belirli Silika Kaynaklarının Yüksek-Sıcaklık Dönüşümlerinde Fe İlavesinin Etkisi
The Effect of Fe Addition on High-Temperature Transformations of Specific Silica Sources
Cengiz BAGCI, Murat ZENGİN, Burak KAYA, Ozgür GÜVEN304-309
- Eriyik Yiğma Modelleme ile Üretilen PLA Parçaların Vida Tutma Kuvvetlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi
Statistical Evaluation of the Screw Pull Out Forces of PLA Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling
Ahmet Murat PİNAR, Berkay ERGENE, Gökmen ATLIHAN, Ahmet Arif MAĞATLI, Fırat KAYA, Burak KARAHAN, Mehmet Emir NİŞANCI.....310-321
- Yüzey Topoğrafyasının Zemin Büyütmesine Etkisi
Effect of Surface Topography on Soil Amplification
Ayhan DOĞAN, Ünal DİKMEN.....322-333
- İtki Vektörünün Doğrusal Kontrolünde Uçuş Yolu Takip Başarımının İncelenmesi
Investigation of Flight Path Tracking Performance in Linear Control of Thrust Vector
Nuri ATİK, Serkan GÜRKAN.....334-346
- Prusias Ad Hypium Roma Dönemi Antik Su Kemerleri ve Tarihi Depremlerde Yok Oluşları
Prusias Ad Hypium Ancient Aqueducts Of The Roman Period and Loss Occurrences Due To Historical Earthquake
Ali ATEŞ.....347-359
- Paylaşımli Elektrikli Skuter Kullanımının Araştırılması: İstanbul İli Örneği
Investigation of the Shared Electric Scooter System Usage: A Case Study in İstanbul
Ayşe POLAT, İsmail ADALIOĞLU, Merve CEYHAN ERDOĞAN, Sinem BOZATLI KARTAL, Gürcan SARISOY.....360-379
- Seyir Radar Verileri Kullanılarak Yüzen veya Sabit Hedeflerin Tespiti İçin Bulanık Sınıflandırıcı Tasarımı
Fuzzy Classifier Design for Detection of Floating or Stationary Targets using Navigational Radar Data
Hande ERKAYMAZ, Semih DURAN, Buğrahan COŞKUN, Ali Ertuğrul ŞAHİN.....380-387

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Effect of Burnishing Process on the Surface Properties of Drilled AISI 1050 and D2 Cold Work Tool Steel Materials

Tuncay Sımsek^{a*}, Alican Yakın^b, Adnan Akkurt^c

Submitted: 02.03.2023 Revised: 16.07.2023 Accepted: 21.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705060

ABSTRACT

Keywords: Burnishing process, surface roughness, microhardness, circularity, cylindricality

^{a*} Kırıkkale Üniversitesi,
Kırıkkale Meslek Yüksekokulu,
Motorlu Araçlar ve Ulaştırma
Teknolojileri Bölümü
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4683-0152
e mail: tuncaysimsek@kku.edu.tr

^b Gazi Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
06560 – Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3013-5286

^c Gazi Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği
06560 – Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0622-1352

*Corresponding author:
tuncaysimsek@kku.edu.tr

In this study, the surfaces of AISI 1050 Medium Carbon Steel and D2 Cold Work Tool Steel, which are commonly used in the machine manufacturing industry, were processed using the burnishing method. In the burnishing experiments, cylindrical materials with dimensions of Ø50x30mm and a Ø20mm hole drilled in the center were used. For the turning process, the cutting speed was selected as 60 m/min and the feed rate as 0.25 mm/rev. The burnishing process was applied in a single pass. The properties such as microhardness, surface morphology, circularity, cylindricality and surface roughness of the materials by the burnishing process were examined in detail. After burnishing, the hardness of AISI 1050 and D2 cold work tool steel materials was measured to be 292 HV and 302 HV, respectively. The results obtained showed that the burnishing process increased the hardness value of AISI 1050 steel proportionally more than the hardness value of D2 steel. It was determined that the circularity and cylindrical properties of the hole surfaces were improved. The obtained results show that the burnishing process will increase the efficiency of the machine elements working in contact and the damage that may occur during the operation of these machine elements can be minimized by burnishing process.

AISI 1050 ve D2 Soğuk İş Takım Çeliği Malzeme Üzerine Açılmış Deliklere Uygulanan Ezme İşleminin Yüzey Özelliklerine Etkisi

ÖZ

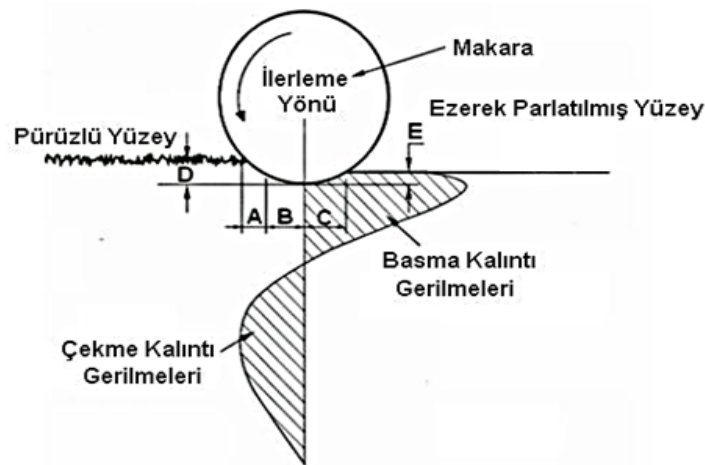
Bu çalışmada; makine imalat sanayinde yoğun olarak kullanılan AISI 1050 Orta Karbonlu Çelik ve D2 Soğuk İş Takım Çeliği malzemelerinin yüzeyleri ezme yöntemi ile işlenmiştir. Ezme deneylerinde, Ø20 mm çapında delik delinen Ø50X30mm ölçülerindeki silindirik malzemeler kullanılmıştır. Tornalama işlemi için kesme hızı 60 m/dak ve ilerleme hızı 0.25 mm/devir seçilmiştir. Ezme işlemi delme sonrası tek paso olacak şekilde uygulanmıştır. Ezilme işlemi ile elde edilen yüzeyler üzerinden mikro sertlik, yüzey morfolojisi, dairesellik, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri tespit edebilmek için ölçümler yapılmış, görüntüler alınmıştır. Ezme işlemi sonrasında AISI 1050 ve D2 soğuk iş takım çeliği malzemelerinin sertlikleri sırasıyla 292 ve 302 HV ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ezme işleminin; AISI 1050 çeliğinin sertlik değerini D2 çeliğinin sertlik değerinden oransal olarak daha fazla artırdığını göstermiştir. Ezme işlemi ile her iki malzeme türü için de yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı ve yüzey kalitesinin arttığı tespit edilmiştir. İşlem sonrası, delik yüzeylerinin dairesellik ve silindiriklik özelliklerinin önemli derecede geliştirildiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, ezme işleminin özellikle birbirleri ile temas halinde çalışan makine elemanlarının verimliliğini artırdığı ve yorulma ömürlerini uzattığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Ezme işlemi, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, dairesellik, silindiriklik

1. Giriş (Introduction)

Makine imalat ve bileşik sanayi kollarında herhangi bir amaç doğrultusunda kullanılan parçaların delik yüzeylerinin istenen niteliklerde olması için klasik işleme metotlarından (delme ve tornalama) sonra honlama, taşlama ve raybalama gibi son yüzey işleme yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Kullanılan bu yöntemler delik yüzeyleri için yöntemin özelliğine bağlı olarak sınırlı tolerans aralıklarında yüzey elde edilebilmesini sağlamaktadır. Çoğu zaman elde edilen bu tolerans aralıkları istenildiği hassasiyetlere ulaşmayı mümkün kılmamaktadır. Talaşsız şekillendirme yöntemi olan ezme metodu ise daha iyi yüzey bitirme özelliği sunması sayesinde son zamanlarda talaşlı uygulamalara oranla daha çok ilgi çekmektedir. Ayrıca ezme yönteminin kolay uygulanabilir ve nispeten daha ucuz olması da bu yöntemin daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Ucuz ve pratik uygulanabilir olmasının yanı sıra, ezme işleminin istenen hassasiyette yüzey kalitesi sağlaması, bu yöntem makine parçalarının bitirme işlemlerinde diğer yöntemlere nazaran daha çok tercih edilmesine sebep olmaktadır [1-3]. Ezme yönteminin metal ve alaşımlarının yüzey pürüzlülüğü, sertlik, aşınma direnci, yorulma ve dairesellik-silindiriklik gibi özelliklerini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Sahip olduğu bu avantajlardan ötürü ezme işlemi, makine konstrüksiyon, otomotiv, havacılık ve endüstrinin birçok kolunda yaygınlaşarak kullanılmaktadır. Piston kolu, şaft, aks, mil gibi makine elemanlarının yüzeyinin ve dairesellik ve silindiriklik özelliklerinin oldukça iyi olması beklenmektedir. Bu özelliklerin iyi olması güç ve hareket aktarımını önemli ölçüde olumlu etkilemekte dolayısıyla enerjiden tasarruf sağlamakta ve makine elemanlarının ve güç organlarının zarar görmesini engellemektedir [1, 4].

Bu çalışmada kullanılan AISI 1050 çeliği ve D2 takım çeliği numunelerine yüzey pürüzlülük, yüzey sertlik ve dairesellik ve silindiriklik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ezme işlemi uygulanmıştır. Makine elemanlarının verimliliğinin artırılması için yüzey pürüzlülüğü, sertlik, dairesellik ve silindiriklik gibi özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmenin en etkili yollarından biri son yıllarda öne çıkan ezme yöntemidir. Ezme yöntemi pürüzsüz ve sert bilyelerin iş parçasının yüzeyinde deformasyon meydana gelmesi işlemi kapsamaktadır. Silindirik küresel uçlu yapılar belli kuvvetlerle malzeme yüzeyine temas ettirilerek deformasyon sertleşmesinin oluşması sağlanmaktadır. Bu işlemin sonucunda aşınmaya karşı dayanıklı, sert ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmektedir. Şekil 1 ezme işlemi ve deformasyon sertleşmesinin şematik görselini göstermektedir. (A) bölgesi ezme işlemi öncesi talaşlı imalat uygulanmakta (raybalama, tornalama, delme), (D) numune yüzeyine ilk temas gerçekleşmekte ve malzemenin akma sınırının geçildiği bölge (B) olmaktadır. (C) bölgesi plastik deformasyonun, (E) bölgesi ise belirli miktarda elastik dönüşüm ile iş parçasının yüzeyinin pürüzsüz ve parlak olması ile sonuçlanan bölgeleri göstermektedir [1].



Şekil 1. Ezme işlemi ve plastik deformasyon oluşumu [1] (Burnishing process and formation of plastic deformation)

Ezme işleminde pürüzsüz bir katman elde etmek için işlem parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ezme işleminde yüzey kalitesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. İlerleme hızı, bilye malzemesi ve çapı, ezme hızı, yağlayıcı ve işlem malzemesi en önemli parametreler arasında yer almakta ve bu parametrelerin iyi bir şekilde optimize edilmesi kaliteli bir yüzeyin elde edilmesine katkı sağlamaktadır [5]. Literatür çalışmalarına bakıldığında birbirinden farklı çeşitli

malzeme gruplarının ezme işlemine tabi tutularak parlatıldığı açıkça görülmektedir. Koçak, ezme işleminden sonra Al 6013 ve MS58 malzemelerinin yüzey pürüzlülüğünde, mikroyapısında ve mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir [6]. Hasan ve arkadaşları ise ilerleme hızı ve ezme kuvveti parametrelerinin alüminyum ve pirinç malzemeleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır [7]. Başka bir çalışmada Akkurt ve arkadaşları ezme işleminin Al 6061 alaşım parçalarının dairesellik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerine etkisi araştırılmıştır [8]. Ezme işleminden sonra AA7075-T6 alüminyum alaşımı malzemesinde meydana artık gerilmeler detaylı bir şekilde Malyer tarafından analiz edilmiştir [9]. Akkurt tarafından yapılan başka bir çalışmada, D3 takım çeliğine ezme işlemi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar; honlama, delme, tornalama ve raybalama gibi yüzey bitirme işlemleriyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [10]. El-Khabeery ve arkadaşları Al-6061-T6 alaşımına farklı ezme parametreleri uygulayarak bu parametrelerin yüzey özelliklerine etki miktarlarını incelemiştir. Yapılan inceleme sonucunda hızın yüksek ve paso derinliğinin fazla olması durumunun yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediğini göstermiştir. Öte yandan düşük hız ve düşük paso kalınlığı seçildiğinde daha pürüzsüz ve düzgün bir yüzey elde edildiği görülmüştür [11]. Sagbas yaptığı çalışmada ezme parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisini araştırmış ve elde ettiği sonuçlar ezme parametrelerinden hız ve paso sayısının yüzey özelliklerini en çok etkileyen faktörler olduğunu göstermiştir [12].

Bu çalışmada AISI 1050 Orta Karbonlu Çelik ve D2 Soğuk İş Takım Çeliği malzemeler ezilerek parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Ezme işlemi için uygun boyutların elde edilmesi için malzemeler CNC torna tezgâhı kullanılarak delinmiştir. Delik iç yüzeyleri, ezme parametreleri uygun hala getirildikten sonra karakterizasyon işlemi yapılmıştır. Malzemelerin morfolojik ve sertlik özellikleri optik mikroskop ve mikro sertlik cihazları kullanılarak karakterize edilmiştir. Ek olarak numunelere ait dairesellik-silindiriklik ve pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Method)

Yapılan çalışmada ekonomik olması nedeniyle endüstride çok yoğun bir şekilde kullanılan AISI 1050 karbon çeliği ve D2 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. AISI 1050 ve D2 soğuk takım çeliği malzemelerine ait bazı mekanik özellikler (elastik modül, akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik değerleri) ise Tablo 3’te verilmiştir. Deney numuneleri çubuk şeklinde dolu malzemeden 50x30 mm ölçülerinde kesildikten sonra iç delik çapları Taksan TTC-630 modeli CNC torna tezgahında soğutma sıvısı kullanılarak 20 mm olacak şekilde delinmiştir. CNC torna tezgahında tüm numunelerin son yüzey işleme payları bırakılarak delinmiştir. Delme işlemlerinde kesme hızı 60 m/dak, ilerleme 0.25 mm/devir olarak seçilmiştir. Kesici takım olarak ISCAR marka uç kullanılmıştır. Kullanılan ucun uç yarıçapı 0.8 mm’dir.

Tablo 1. AISI 1050 Karbon Çeliğine ait kimyasal içerik (Chemical content of AISI 1050 carbon steel)

Kimyasal Element	C	Si	Cr	S	Mn	P	Fe
Ağırlıkça %	0.51	0,16	-	0.028	0.62	0,020	Kal.

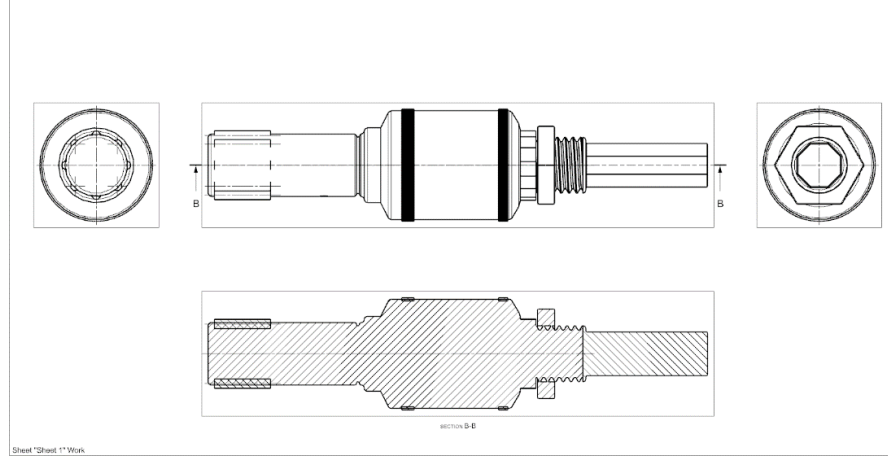
Tablo 2. D2 Soğuk İş Takım Çeliğine ait kimyasal içerik (Chemical content of D2 cold work tool steel)

Kimyasal Element	C	Si	Cr	S	Mn	P	Mo	V	Fe
Ağırlıkça %	1.45-1.60	0.10-0.60	11.00-13.00	0.03	0.20-0.60	0.03	0.60-0.80	0.90-1.10	Kal.

Numuneler CNC tezgâhı kullanılarak delindikten sonra Şekil 2’de gösterilen ezme aparatı ile ezilerek parlatılmıştır (Akkurt, 2011). Bu çalışmada ezme kuvveti 150 N, ezme hızı 1.25 mm/s, devir sayısı 250 rpm, ezme derinliği 0.05 mm ve paso sayısı 1 olarak seçilmiştir. Ezme işlemi 10 mm çaplı bilyelere sahip ezme aparatı kullanılarak yağlı ortamda yapılmıştır. Ezme işlemi 10 mm uzunluğu boyunca tek paso halinde gerçekleştirilmiştir. Ezme işlemi boyunca devamlı olarak bilyeler ve iş parçasının pürüzlü yüzeyi arasında plastik deformasyon sonucu ezme ve geriye esneme işlemleri tekrarlanmıştır. Çünkü, iş parçası delik çapı 20 mm delinmiş, takım çap ölçüsü 20,05 ayarlanmış (malzemeye bağlı ezme payı), işlem sonrası delik ölçüsü 20,02 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, ezme işleminin malzemelerin dairesellik silindiriklik özelliklerine etkilerini analiz edilmiştir. Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde Taylor Hobson FTS PGI 1230, dairesellik-silindiriklik ölçülmesinde ise Taylor Hobson TR 585 cihazı kullanılmıştır. Dairesellik-silindiriklik analizlerinde 3 farklı konumdan ölçüm alınmıştır.

Tablo 3. AISI 1050 ve D2 soğuk iş çeliğinin bazı mekanik özellikleri (Some mechanical properties of AISI 1050 carbon steel and D2 cold work tool steel)

Malzeme	Akma dayanımı	Çekme Dayanımı	Poisson Oranı	Elastisite modülü
AISI 1050	580 MPa	690	0.3	190-210 GPa
D2 soğuk iş çeliği	469 MPa	759 MPa	0.3	190-210 GPa

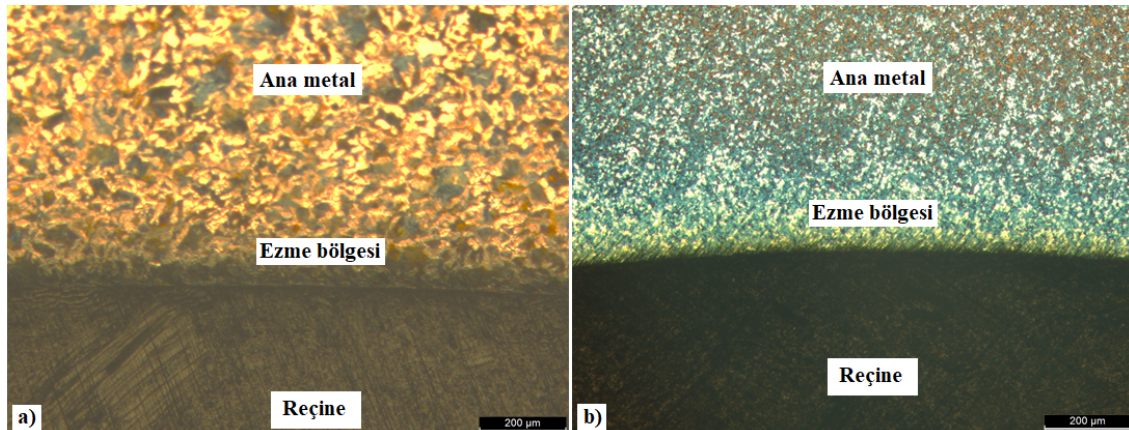


Şekil 2. Ezme işleminde kullanılan ezme aparatının şematik gösterimi (Akkurt, 2011) (Schematic representation of the burnishing apparatus)

Ezme işlemi tamamlanan numuneler, metalografik incelemelere hazırlanmak üzere aşındırıcı disk ile kesilmiştir. Numunelerin dağlama işlemi %2 nital çözeltisi ile yapıldıktan sonra optik mikroskopta (Leica M205 C) incelenmiştir. Daha sonra numunelerin dairesellik-silindiriklik ve yüzey pürüzlülükleri analiz edilmiştir. Bu işlemlerin ardından ezmenin sertlik üzerindeki etkilerinin incelenmesi için elmas piramit uç kullanılarak 50 g yük ve 10 s bekleme süresi parametreleri ile mikro sertlik testleri (Shimadzu HVM-2) yapılmıştır.

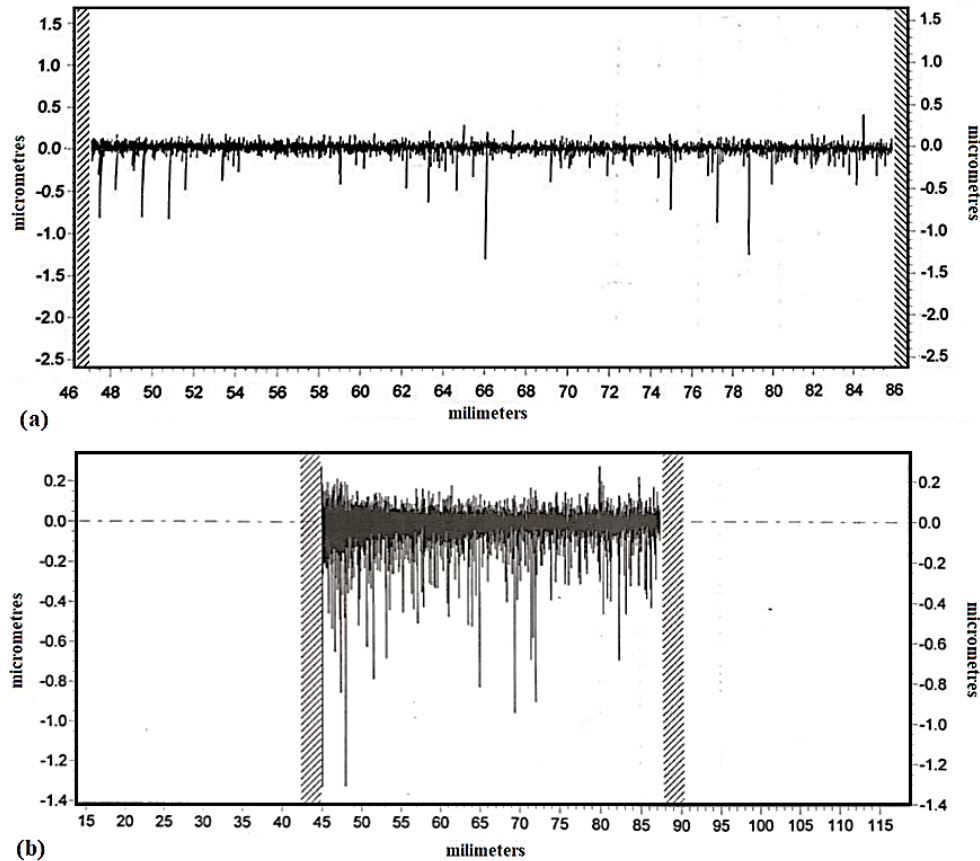
3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Şekil 3'te AISI 1050 Orta karbonlu çelik ve D2 soğuk iş takım çeliği malzemelerin ezme işlemlerinden sonra metalografik işlemler için hazırlanmış optik mikroskopik görüntüleri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde anametal ile ezme işlemi uygulanmış bölgelerin mikro yapılarının farklılık gösterdiği görülmektedir. AISI 1050 malzemesinde ezilmiş bölgeden ana metala geçiş bölgesinde yaklaşık 40 μm 'lik deformasyonun meydana geldiği açıkça görülmektedir. D2 malzemesinde ise yaklaşık olarak 52 μm 'lik bir deformasyon görülmektedir. Ezme işlemi sırasında ezme takımı tarafından yüzeye uygulanan kuvvetler neticesinde mikro yapının değiştiği ve uygulanan kuvvetlerin miktarına bağlı olarak numunede sert katmanlar oluştuğu bilinmektedir. Belirli kuvvetlerin etkisinde kalan iş parçasının mikroyapısında meydana gelen dislokasyon yoğunluğu deformasyon sertleşmesinin oluşmasına ve deformasyon sertleşmesi sonucunda bu sert katmanların oluştuğu bilinmektedir. Deformasyon sertleşmesi sonrasında daha ince formların oluştuğu görülmektedir [13].



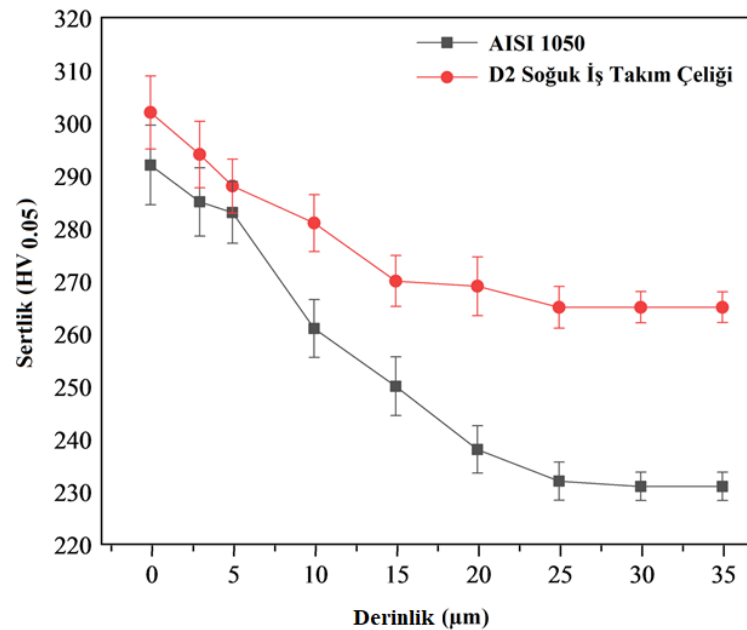
Şekil 3. Ezme işlemi sonrası optik mikroskop görüntüleri a) AISI 1050 Orta karbonlu çeliği malzeme b) D2 soğuk iş takım çeliği malzeme (Optical microscope images after burnishing a) AISI 1050 low carbon steel material b) D2 cold work tool steel material)

Şekil 4 ise ezme uygulamasından sonra numunelerin yüzey pürüzlülük grafiklerini göstermektedir. Delik iç yüzeyleri tornalandıktan sonra AISI 1050 ve D2 çelik malzemelerinin yüzey pürüzlülükleri 1,34 μm ve 1,42 μm olarak bulunmuştur. Ezme işleminden sonra ortalama pürüzlülük değeri AISI 1050 karbon çeliği için $R_a:0.366 \mu\text{m}$, D2 malzemesi için ise $R_a:0.461 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür [14]. Omar tarafından yapılmış olan bir çalışmada ezme işleminin Al 6061-T6 alaşımının yüzey sertliği ve pürüzlülüğü üzerine etkisini konu alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ezme işleminin yüzey pürüzlülüğünü % 87 azalttığı ve sertlik değerini ise %14 arttırdığını göstermiştir [1]. Başka bir çalışmada Nguyen ve arkadaşları tarafından ezme parametrelerinin yüzey özelliklerine etkisi araştırılmış ve ezme hızının belli bir miktara kadar artırılmasının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını ancak belli bir hız değerinden sonra pürüzlülük değerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca paso derinliğinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün artış gösterdiği not edilmiştir. Yüzey sertliğinin ve sertlik derinliğinin ezme pasosunun derinliğinin artmasına bağlı olarak arttığı görülmüştür [2]. Korzyski yaptığı bir çalışmada ezme kuvvetini ve paso sayısının yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etki ettiğini gözlemlemiştir. Ayrıca kaliteli bir yüzey elde etmek için uygulanması gereken kuvvetin sadece numunenin mekanik özelliklerinin değil ayrıca başlangıç yüzey pürüzlülük değerlerinin dikkate alınarak seçilmesi gerektiği Korzyski tarafından vurgulanmıştır [15]. Okada ve arkadaşları ezme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisini araştırmış ve bu araştırma sonucunda ezme kuvvetinin ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin büyük olduğunu vurgulamışlardır. Ezme kuvvetinin artması ve ilerleme hızının azaltılması ile düzenli ve sürekli bir yüzey elde edildiği Okada ve arkadaşları tarafından gözlenmiştir [16]. G. Patel ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışmada yüzey pürüzlülüğünü etkileyen temel faktörün ezme kuvveti / baskı olduğunu vurgulamışlardır [17]. Başka bir çalışmada Yuan ve arkadaşları ezme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve mikro sertliğe etkileri araştırılmıştır. Ezme derinliği belirli bir miktara kadar artırıldığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ancak belirli miktardan sonra arttırmaya devam edildiğinde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlenmiştir. Mil hızı belirli bir miktara kadar artırıldığında yüzey pürüzlülüğünün arttığı ancak arttırmaya devam edildiğinde pürüzlülüğü azalttığı vurgulanmıştır [18]. Bu çalışmada elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde ezme işlemi sonrasında pürüzlülüğün önemli ölçüde düştüğü açıkça görülmektedir. Bu durum ezme işleminin yüzey kalitesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Ezme işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri a) AISI 1050 Orta karbonlu çelik, b) D2 soğuk iş takım çeliği (Surface roughness values after burnishing, a) AISI 1050 low carbon steel, b) D2 cold work tool steel)

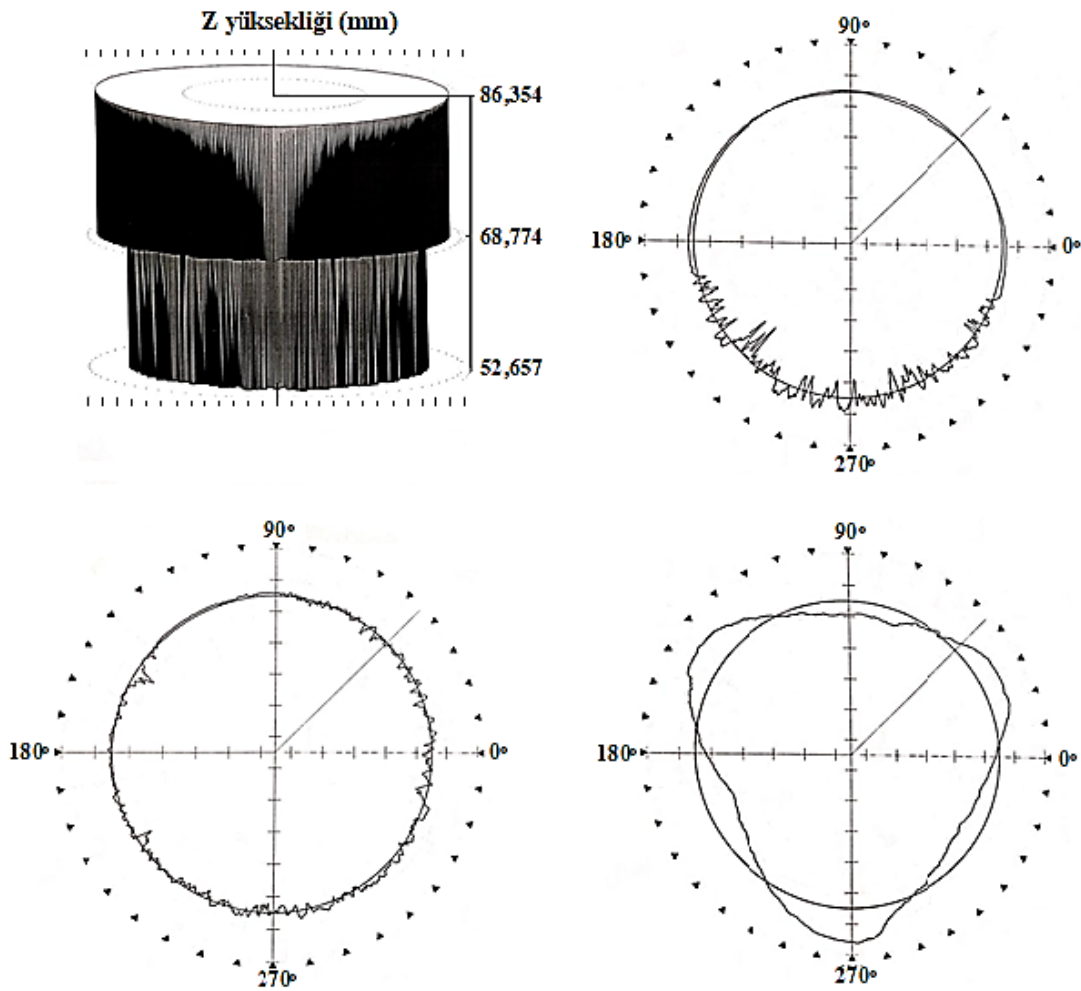
Ezme işleminden sonra numunelerin mikro sertlik değerleri delik kenarından malzemeye doğru olacak şekilde ölçülmüş ve elde edilen değerler Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere AISI 1050 malzemesinin ana metalin sertliği yaklaşık olarak 230 HV değerine sahipken delik yüzeyine doğru ilerledikçe sertlik değerlerinin artarak 292 HV maksimum değerine sahip olmaktadır. D2 malzemesinde ise yaklaşık olarak 265 HV sertliğe sahip ana malzemenin sertliği ezme işleminden sonra 302 HV'ye çıkmıştır. Ezme işlemi malzemede yoğun plastik deformasyona ve nihayetinde deformasyon sertleşmesine sebep olduğu için, sertlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Ezme işleminin istenen sonuçları vermesi için, ezme kuvveti, ilerleme hızı, ezme geçiş parametresi ve nüfuziyet derinliği birçok faktörün uygun bir şekilde seçilmelidir. Bahsedilen parametrelerden birinin veya birkaçının uygun seçilmemesi durumunda malzeme yüzeyinde pullanmaya, çatlama ya da kopmalara sebep olmaktadır. Khalilpourazary ve arkadaşlarının yürüttüğü bir çalışmada elde ettikleri sonuçlar, ezme kuvvetinin ve nüfuziyet derinliğinin artmasına bağlı olarak mikro sertlik değerlerinin de arttığını göstermiştir. Artan ezme kuvveti ve nüfuziyet derinliğinin malzeme yüzeyinde yoğun plastik deformasyona sebep olduğu bu nedenle malzeme yüzeyinin mikro sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ancak kuvvetin ve nüfuziyet derinliğinin artması sertlik değerlerinin aksine yüzey pürüzlülük değerini arttırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [19]. Rotella ve arkadaşları ezme işleminde farklı soğutma ve yağlama koşullarını sağlayarak bu parametrelerin yüzey kalitesine olan etkisi Ti6Al4V alaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kriyojenik soğutma sıvısının kullanılması durumunda mikro sertlik değerlerinde artışın meydana geldiğini ancak pürüzlülük değerlerinde kayda değer değişiklik olmadığını göstermiştir. Soğutma sıvısı yerine yağlama sıvısı kullanıldığında ise yüzey pürüzlülük değerlerinin önemli ölçüde azaldığı Rotella ve arkadaşları tarafından gözlenmiştir [20]. Tugay ve arkadaşları tarafından ezme işleminin 316 L paslanmaz çelik malzemesinin mikro sertliğine ve korozyon direncine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ezme işleminin malzemenin mikro sertliğini %45 arttırdığı ve korozyon direncini iyileştirdiği gözlenmiştir [21]. Yuan ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada mil hızının ve ezme derinliğinin artmasıyla yüzey sertliğinin arttığını vurgulamışlardır [18]. Çobanoğlu ve arkadaşları ezme parametrelerinin mikro sertliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmış ve ezme kuvvetinin mikro sertliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin diğer parametrelere nazaran daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Ezme hızı ve ilerleme hızının ise mikro sertliğe etkisinin yüksek olduğu ancak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin daha düşük olduğu gözlenmiştir [22]. Literatür çalışmalarına bakıldığında uygun ezme parametreleri kullanıldığında yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerinde muazzam iyileşmeler meydana geldiği görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara bakıldığında literatür çalışmalarına benzer bir şekilde ezme işleminin yüzey pürüzlülüğünü ve mikro sertliği önemli ölçüde iyileştirdiği açıkça gözlenmektedir.



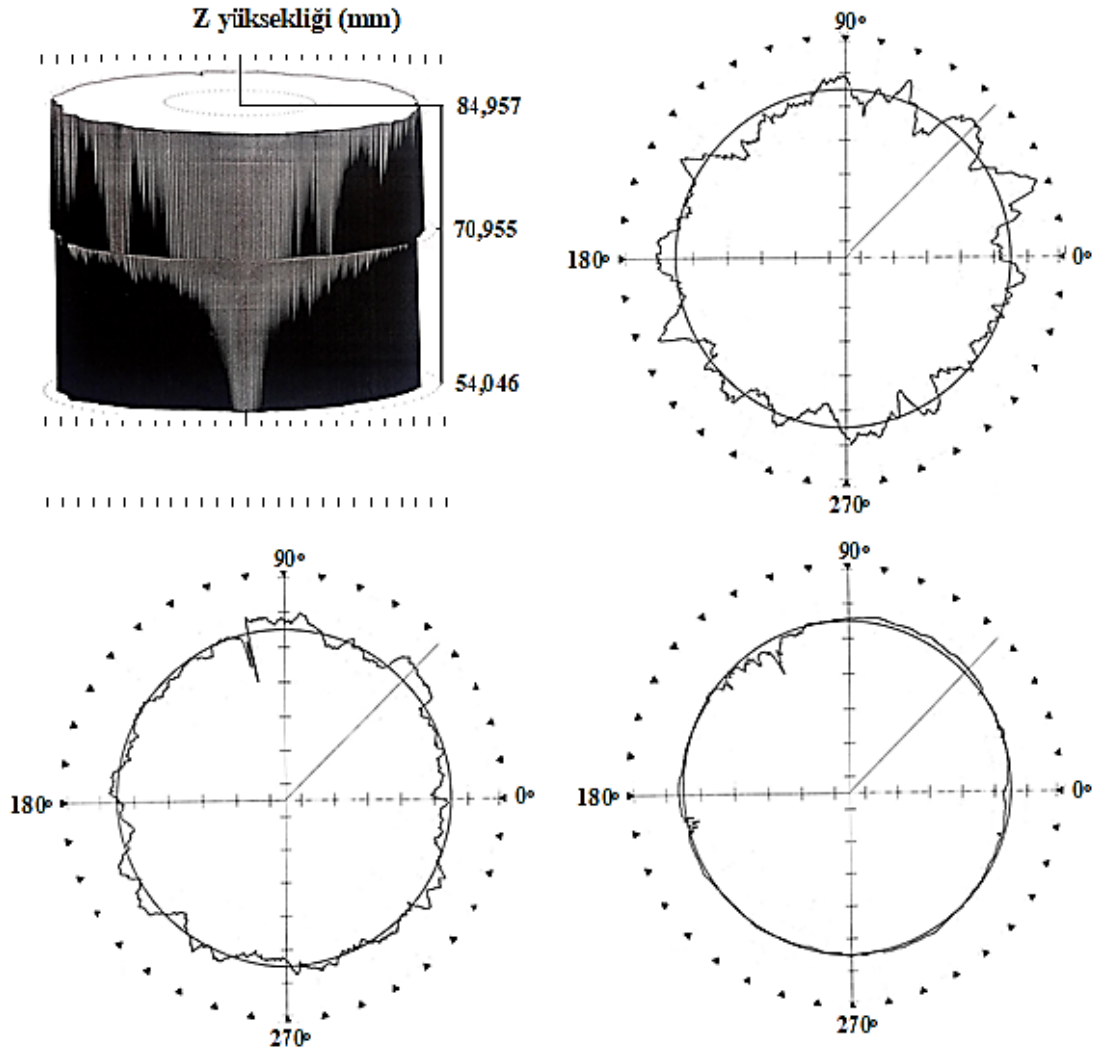
Şekil 5. Ezilen numunelerin mikrosertlik grafikleri (Microhardness graphs of speimens after burnishing)

Şekil 6 ve Şekil 7 ise numunelere ait iç çap silindiriklik ve dairesellik görsellerini göstermektedir. Ezme işleminden sonra AISI 1050 ve D2 malzemelerinin silindiriklik değerleri 17.05 ve 70.87 µm olarak

ölçülmüştür. Makine imalat sanayisi imal edilen makine parçalarının hassas geometrik toleranslara sahip olmasını istemektedir. Ezme işleminde kullanılan takımların aşınması, kesme esnasında kuvvetlerin düzensiz olması (paso sayısı ve kalınlığı, kesme hızı vb.) sebeplerden ötürü dairesellik istenen düzeyde elde edilememektedir. Bu nedenle ezme parametrelerinin uygun seçilmesi oldukça önem arz etmektedir. Mühendislik parçalarının ideal geometride olması bütün sanayi uygulamalarında istenen özellik olduğu bilinmektedir. Dönme hareketinde bulunan güç aktarma organları vb. makine parçaları için silindiriklik ve daireselliğin önemi büyük olmaktadır. Silindiriklik ve daireselliğin uygun olmaması durumunda dönen makine elemanlarının temas ettiği yüzeylerde aşınma meydana gelmekte, güç kaybı oluşmakta ve dolayısıyla ciddi ekonomik kayıplar oluşmaktadır [10]. Ezme süresi ve derinliğinin silindiriklik ve dairesellik üzerinde önemli bir etkiye olduğu bilinmektedir. Bu yüzden paso sayısı minimum tutularak 0.05 mm derinliğinde tek bir paso uygulanmış ve ezilme işlemi yapılmıştır. Ezme derinliği, belirli miktarlarda uygulandığında daireselliği arttırabilmektedir ancak belirli miktarların üzerinde ezme derinliğinin uygulanması malzemede yanmaya ve yüzeyde pullanmaya sebep olmaktadır [23, 24]. Dairesellik değeri maksimum ve minimum yarıçap profilinin farkı alınarak ölçülmektedir. Yapılan çalışmada iç dairesellik, orta kenar ve kenar dairesellik değerleri ise AISI 1050 çeliği için 12.22, 2.09 ve 4.03 μm , D2 soğuk iş takım çeliği için ise 42.32, 36.11 ve 10.30 μm olarak hesaplanmıştır. Ezilen numunelerin sertlik değerlerinin düşük olması silindiriklik değerlerinin daha iyi olmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. Ezme işlemi sonrası AISI 1050 Orta karbonlu çeliğinin silindiriklik ve dairesellik değişimleri
(Cylindrical and circularity changes of AISI 1050 low carbon steel after burnishing)



Şekil 7. Ezme işlemi sonrası D2 soğuk iş takım çeliğinin silindiriklik ve dairesellik değişimleri (Cylindrical and circularity changes of D2 cold work tool steel after burnishing)

4. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada AISI 1050 orta karbon çeliği ve D2 soğuk iş takım çeliği malzemeleri ezme işlemine tabi tutulmuştur. Ezme işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin arttığı ve pürüzlülük değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Ezme işleminin uygulanmasıyla, AISI 1050 orta karbon çeliği ve D2 soğuk iş takım çeliği malzemelerinin sertlikleri sırasıyla 292 ve 302 HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ezme işleminin; AISI 1050 çeliğinin sertlik değerini D2 çeliğinin sertlik değerinden oransal olarak daha fazla arttırdığı görülmektedir. Ezme işlemiyle, AISI 1050 ve D2 çelik malzemelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.366 ve 0.461 μm olarak ölçülmüştür. Ezme işlemi sonrasında AISI 1050 çeliğinin pürüzlülük değerinin D2 çeliğinin pürüzlülük değerinden daha düşük olduğu yani yüzey kalitesinin daha iyi olduğu görülmektedir. Bu çalışmada uygulanan parametrelere bağlı olarak ezme işlemi uygulanmayan malzemelerden sertlik değeri daha düşük olanın ezme işlemi sonrasında daha düşük pürüzlülük değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Pürüzlülük değerleri dikkate alındığında, ezme işleminin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği görülmektedir. Numunelerin iç dairesellik, orta kenar ve kenar dairesellik değerleri ise AISI 1050 çeliği için 12.22, 2.09 ve 4.03 μm , D2 soğuk iş takım çeliği için ise 42.32, 36.11 ve 10.30 μm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, ezme işleminin dairesellik ve silindiriklik toleranslarını geliştirdiğini ortaya koymuştur.

Teşekkür (Acknowledgment)

Yapılan çalışmaya katkılarından dolayı YETER MAKİNE ve Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye destekleri için teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] O. Bataineh, "Effect of roller burnishing on the surface roughness and hardness of 6061-T6 aluminum alloy using ANOVA," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 8, no. 4, pp. 565-569, 2019. doi:18178/ijmerr.8.4.565-569
- [2] T.-T. Nguyen and X.-B. Le, "Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 33, no. 11, pp. 1233-1241, 2018. doi:10.1080/10426914.2018.1453159
- [3] T. Zhang, N. Bugtai, and I. D. Marinescu, "Burnishing of aerospace alloy: a theoretical-experimental approach," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 37, pp. 472-478, 2015. doi:10.1016/j.jmsy.2014.11.004
- [4] G. Duncheva, J. Maximov, A. Anchev, V. Dunchev, T. Atanasov, and J. Capek, "Finite element and experimental study of the residual stresses in 2024-T3 Al alloy treated via single toroidal roller burnishing," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, pp. 1-11, 2021. doi:10.1007/s40430-020-02775-8
- [5] T. Mohamed, H. Hamid, A. Salah, and B. Salim, "Effect of roller burnishing parameters on roughness surface and hardness of unalloyed S 355 J0 steel by using response surface methodology," *Manufacturing Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 602-610, 2017.
- [6] H. Koçak, "Al 6013 ve MS 58 malzemelere delik içi ezerek parlatma işlemi uygulanmasıyla yüzeysel özelliklerin iyileştirilmesi," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, cilt 8, sayı 4, ss. 972-980, 2020. doi:10.29109/gujsc.821576
- [7] A. M. Hassan and A. S. Al-Bsharat, "Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals," *Wear*, vol. 199, no. 1, pp. 1-8, 1996. doi:10.1016/0043-1648(95)06847-3
- [8] A. Akkurt ve İ. Ovalı, "Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçalarının Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, cilt 15, sayı 3, 2009.
- [9] E. Malyer, "Ezerek parlatma yapılan AA7075-T6 alüminyum alaşımında meydana gelen kalıntı gerilmelerin incelenmesi," *Politeknik Dergisi*, cilt 21, sayı 3, ss. 565-573, 2018. doi:10.2339/politeknik.389592
- [10] A. Akkurt, "Comparison of roller burnishing and other methods of finishing treatment of the surface of openings in parts from tool steel D3 for cold forming," *Metal science and heat treatment*, vol. 53, no. 3-4, p. 145, 2011. doi:10.1007/s11041-011-9358-2
- [11] M. El-Khabeery and M. El-Axir, "Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity," *International Journal of machine tools and manufacture*, vol. 41, no. 12, pp. 1705-1719, 2001. doi:10.1016/S0890-6955(01)00036-0
- [12] A. Sagbas, "Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function," *Advances in Engineering Software*, vol. 42, no. 11, pp. 992-998, 2011. doi:10.1016/j.advengsoft.2011.05.021
- [13] V. J. Prasad, K. S. Joshi, V. V. Ramana, and R. Chiranjeevi, "Effect of roller burnishing on surface properties of wrought AA6063 aluminium alloys," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 8033-8040, 2018. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.488
- [14] A. Hassan, "An investigation into the surface characteristics of burnished cast Al-Cu alloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 6, pp. 813-821, 1997, doi:10.1016/S0890-6955(96)00058-2
- [15] M. Korzynski, "Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 12-13, pp. 1956-1964, 2007. doi:10.1016/j.ijmactools.2007.03.002
- [16] M. Okada, S. Suenobu, K. Watanabe, Y. Yamashita, and N. Asakawa, "Development and burnishing characteristics of roller burnishing method with rolling and sliding effects," *Mechatronics*, vol. 29, pp. 110-118, 2015. doi:10.1016/j.mechatronics.2014.11.002
- [17] J. G. Patel and Y. VAGHELA, "To Study and Optimize the Process Parameter Throw Roller Burnishing Process on EN19 Material by Response Surface Methodology," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 6, no. 6, pp. 21-30, 2016
- [18] X. Yuan, Y. Sun, L. Gao, and S. Jiang, "Effect of roller burnishing process parameters on the surface roughness and microhardness for TA2 alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 1373-1383, 2016. doi:10.1007/s00170-015-8031-0
- [19] S. Khalilpourazary and J. Salehi, "How alumina nanoparticles impact surface characteristics of Al7175 in roller burnishing process," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 39, pp. 1-11, 2019. doi:10.1016/j.jmapro.2019.01.027

- [20] G. Rotella, S. Rinaldi, and L. Filice, "Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, pp. 431-440, 2020. doi:10.1007/s00170-019-04631-z
- [21] I. O. Tugay, A. Hosseinzadeh, and G. G. Yapici, "Hardness and wear resistance of roller burnished 316L stainless steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 2405-2409, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2021.04.363
- [22] T. Cobanoglu and S. Ozturk, "Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 229, no. 2, pp. 286-294, 2015. doi:10.1177/09544054145279
- [23] N. Loh and S. Tam, "Effects of ball burnishing parameters on surface finish—a literature survey and discussion," *Precision Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 215-220, 1988. doi:10.1016/0141-6359(88)90056-6
- [24] K.-H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, 1987.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

An Approach for Reducing Torque Ripples on Permanent Magnet Synchronous Motors: Slitted Stator Core

Mehmet Murat Tezcan^a, Asım Gökhan Yetgin^b

Submitted: 19.12.2022 Revised: 25.07.2023 Accepted: 01.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705061

ABSTRACT

Keywords: Traction motors, Permanent magnet synchronous motor, Torque ripple, Stator core design, Reluctance torque improve, Slitted stator core structure

^{a,*} Kutahya Dumlupınar University, Faculty of Engineering, Dept. of Electrical and Electronics 43100 - Kütahya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5390-4527
e mail: murat.tezcan@dpu.edu.tr

^b Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Electrical and Electronics Engineering 15030 - Burdur, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3971-0504

*Corresponding author:
murat.tezcan@dpu.edu.tr

Recently permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have been used in many traction applications. Although they have many advantages about energy saving, power-torque density and efficiency, main disadvantage of these motor type is torque ripples. In general, there are two ways for reducing the torque ripples. These methods are motor core magnetic design method and current control method. In this study, slitted stator core teeth geometry has used for reducing the torque ripple. One of the basic missions of slitted cores is generating the useful reluctance torque and helping the more symmetrical distribution of the flux density on magnetic cores of the motor. In this study, an outer rotor PMSM has been used for required performance comparisons. There have been two numerical models created for the performance analysis of outer rotor PMSM. Primarily, a classical analytical outer rotor PMSM model has been created and dynamical analysis of this model has been operated with Finite Element Analysis simulation programme. Afterwards, another FEA performance analysis for same physical and electrical featured but slitted stator core numerical model of outer rotor PMSM has been achieved. Magnetic flux density distributions, torque ripple values and other performance values of each prototype motor have been given in study. When the obtained performance values evaluated, torque ripple value of slitted core PMSM has been %6 less than traditional outer rotor PMSM, besides it has been shown that, mean torque value of slitted core PMSM is 3 Nm bigger than classical outer rotor PMSM.

Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlarda Moment Salınımlarını Azaltmak İçin Yeni Bir Yöntem: Slitli Stator Yapısı

ÖZ

Son zamanlarda sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM'ler) birçok elektrikle tahrik uygulamasında kullanılmaktadır. Enerji tasarrufu, güç, moment yoğunluğu ve verimlilik açısından birçok avantajları olmasına rağmen, bu motor tiplerinin ana dezavantajı moment dalgalanmalarıdır. Genel olarak, moment dalgalanmalarının azaltmanın iki yolu vardır. Bu yöntemler, motor nüvesi manyetik tasarım yöntemi ve akım kontrol yöntemidir. Bu çalışmada, moment dalgalanmasını azaltmak için yarıklı stator nüvesi dış geometrisi kullanılmıştır. Dilimlenmiş stator nüvesinin temel görevlerinden biri, yararlı relüktans momentini üretmek ve akı yoğunluğunun motorun manyetik nüveleri üzerinde daha simetrik dağılımına yardımcı olmaktır. Bu çalışmada, gerekli performans karşılaştırmaları için bir dış rotorlu SMSM kullanılmıştır. Dış rotorlu SMSM'nin performans analizi için oluşturulmuş iki sayısal model vardır. Öncelikle klasik bir analitik dış rotor SMSM modeli oluşturulmuş ve bu modelin dinamik analizi Sonlu elemanlar analizi (SEA) yapan simülasyon programı ile çalıştırılmıştır. Daha sonra, dış rotorlu SMSM'nin aynı fiziksel ve elektriksel özellikli ancak yarıklı stator nüvesi nümerik modeli için başka bir SEA performans analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her bir prototip motora ait manyetik akı yoğunluk dağılımları, moment dalgalanma değerleri ve diğer performans değerleri verilmiştir. Elde edilen performans değerleri değerlendirildiğinde, yarıklı nüveye sahip SMSM'nin moment dalgalanma değeri, geleneksel dış rotorlu SMSM'ye göre %6 daha az olmuş, ayrıca yarıklı nüveli SMSM'nin ortalama moment değerinin klasik dış rotorlu PMSM'ye göre 3 Nm daha büyük olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrikle tahrik motorları, Sabit mıknatıslı senkron motor, Moment dalgalanması, Stator nüve tasarımı, Relüktans moment iyileştirmesi, Yarıklı stator nüve yapısı

1. Introduction

PMSMs are used in many industrial applications in order to their compact structure [1], high torque density, high airgap flux density, high acceleration specs and their good power/weight specs with regard to other electric motors used in industry [2]. Today in order to evolution of hard magnetic materials and improvements on electric motor manufacturing aspects in industry, PMSMs are used on the structures of hybrid electric vehicles, electric vehicles and fuel cell electric vehicle technology [3]. Besides, PMSMs are also used in high performance positioning systems that used on CNCs [4]. Although the advantages, PMSMs have some disadvantages. The most important disadvantages are their torque ripple and cogging torque effects. Especially, these effects are unwanted situations on sensitive control applications. Though, they can cause the acoustic noise and resonances on mechanical components of the traction systems [5].

There are two methods in order to get a better torque profile (in order to decrease the cogging torque effect) on PMSMs. One is about designing the PMSM. This method contains lots of applications. Suitable installing the stator windings, assigning the suitable magnet-pole embrace ratios, using the suitable skewed stator lamination packaging and shifting the magnet pole [2] positions are some of the cogging torque minimization techniques. Main disadvantage of these techniques is implementation cost [6]. Second method is well power electronic control techniques. These control techniques are implemented on PMSMs easily and cheaply but, the shaft torque is never best [4].

Yan et al. have suggested an adjustable dynamical programme (ADP) for minimizing the cogging torque ripples. An optimal controller, dynamical programming theory and strategical iteration methods are used for achieving the minimum mean torque error value. It has showed that better torque ripple performance and shorter dynamical adjusting time on steady state condition of ADP [7].

Tao et al. have suggested a new IARC controller for current controllers in order to minimize the torque ripples on PMSM traction systems. IARC has been suggested with forecasting of back EMF harmonics and a practical torque production model. Also, it has been designed with current loop model in order to minimize the torque ripple [8].

Hwang et al. have studied on an application that minimize the mechanical ripple and noise. Application consisted on a notched rotor design. A comparable electromagnetic design has been achieved with similar dimensional rotor and stator structures of different motor models. The difference is notched rotor structure that provides the appropriate ripple and noise value [9].

Hasanien has suggested a digital observer controller for minimum torque ripple value on PMSMs. Suggested controller has achieved dynamical response on rated operation with interrupted load conditions [10]. Flieller et. all have suggested an artificial intelligence method to minimize the torque ripples for trapezoidal back EMF PMSMs. It has suggested that control schemes in order to produce optimal stator currents for better electromagnetic torque value (or speed) and minimum ohmic losses. It has been showed that the validity of AI method from appropriate simulation and experimental results that obtained motor prototype [11].

Ilka et al. applied the Non-Dominant Sequence Genetic Algorithm-II (NSGA-II) method, which is a multi-objective optimization method, to obtain the optimum design of a surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor in order to reduce the cogging torque without changing the output torque. According to the simulation results, they show that the cogging moment is significantly reduced while the output torque has a slight decrease compared to the nominal value [12].

Ali et al. examined the effects of curvature of permanent magnets and the design factors of the slot opening to minimize the value of the cogging torque in a high-power permanent magnet synchronous motor. The obtained results show the effect of applying the slot opening and a significant reduction in the knocking torque due to the curvature of the permanent magnets [13].

Duan et al. revealed the change in magnetic material performance with temperature for PMSM and analyzed the effect of eccentric magnetic pole structure on the cogging torque at different temperatures [14].

In their study, Abbaszadeh and Maroufian modeled a permanent magnet synchronous motor using the Magnetic Equivalent Circuit method and calculated values such as magnetic flux density and magnetic field density. The output torque produced was calculated using the Maxwell Stress Tensor method. Also, a new method of cogging torque minimization based on torque fluctuation from an auxiliary winding is proposed. According to the results obtained, they showed a significant reduction in the amplitude of the torque ripple [15].

In their study, Yu et al. developed a method to optimize the torque performance of the SPMSM in order to ensure that the proposed motor is not smaller than the average torque of the reference motor and to reduce the cogging torque value. In this method, they tried to obtain a new design by using the structural parameters of the engine using the Response Surface Methodology (RSM) and Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) methods [16].

A new method has been suggested for minimizing the cogging torque value on PMSMs in this study. In this method, slits have been implemented on PMSM stator teeth. Main purpose of this implementation, occurring an extra reluctance in airgap region of the motor and providing the penetration of the smooth flux outer surface region of stator core. In order to correct implementation of the slits on teeth, slit widths have been chosen 0.1 mm and slit heights have been chosen sum of the height of stator teeth and magnet height. Compared flux density distributions, torque ripples, mean torque values have been given in fourth chapter that have been obtained reference and slitted PMSM models.

2. Design of Outer Rotor PMSM

Designing of the high efficient and high energy density PMSM traction motors that used in industrial applications is a preferred method. Generally, PMSMs are manufactured with the magnet poles on the rotors. For this purpose, total ohmic losses are comparable less than conventional synchronous motors. Though, PMSMs are high efficient electrical motors that used on industry.

Main dimensions of PMSMs are specified with analytical equations with respect to their mechanical shaft power. Basic analytical modelling principle of specifying the dimensions is specifying the total volume of the motor and derivation of the stator and rotor dimensions from total volume value.

Equation (1) specifies the basic apparent power of an electrical machine. " K_w " is the winding distribution coefficient, " \bar{B} " is the flux density distribution, " a_c " is the electrical loading value, " D " is the stator diameter, " L " is the length of stator core and the " n " rated speed of the motor. Also, it can be calculated that the total volume (D^2L) of outer rotor Hub PMSM.

$$S = 1.11 K_w \pi^2 \bar{B} a_c D^2 L n 10^{-3} \text{ kVA} \quad (1)$$

It has to be calculated the stator per pole flux value for in order to calculate the conductor number per slot (2). After this calculation, in order to specify the stator per phase turn number, stator slot-pole numbers can be used (3). Using these parameters, number of conductors per slot can be specified. Calculating the flux per pole value, " \bar{B} " magnetic loading, " Y " pole pitch and " L " stator core length parameters are used.

$$\phi_m = \bar{B} Y L \quad (2)$$

In order to calculate the number of turns per phase " N_{ph} " (3), the parameters " E_{ph} " (back EMF value of per phase), " K_w " (the winding distribution coefficient), " f " (grid frequency) and " ϕ_m " (flux per pole) are used.

$$N_{ph} = \frac{E_{ph}}{4.44 K_w f \phi_m} \quad (3)$$

According to the mechanical power spec of system that is driven by an outer rotor hub PMSM, electrical and physical parameters of a 2 kW Hub PMSM have been given in Table1.

Table 1. Electrical and physical parameters of a 2 kVA Hub PMSM

Parameter	Value	Unit
Output Power (S)	2	kW
Reference Speed (n)	700	rpm
Stator Slot Number	24	slot
Motor Pole Number	22	pole
Winding Dist. Coeff. (K_w)	0.95	---
Stator Diameter	238	mm
Stator Core Length	100	mm
Machine Length (L)	309	mm
Flux per pole (ϕ_m)	39	mWb
Number of Turns per Phase (N_{ph})	40	turn
Number of conductors per slot	10	---

3. Slits Effects on Electrical Motors

According to machine type, main torque ripple components are cogging torque ripple and torque ripple on PMSMs has been given in Figure 1.

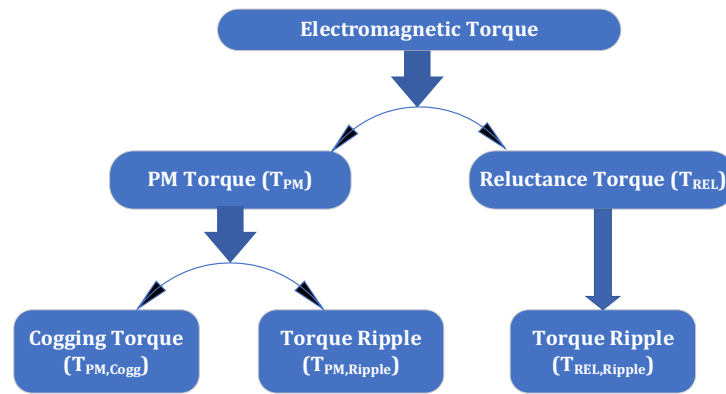


Figure 1. Torque ripple components of PMSMs [5]

For the salient rotor topologies like reluctance motors, interior magnet PMSMs, PM assisted synchronous reluctance motors, additional torque ripples can be occurred from the interaction between the stator flux and the rotor reluctance harmonics. These harmonics, as shown in Figure 1, can be caused by magnets or by changing the air gap magnetic resistance value. However, in Permanent magnet or magnet assisted motors, the cogging torque that occurs when a magnet pole passes through a stator slot region can also produce torque ripple.

Cogging Torque is the result of the interaction between the magnet pole area and the reluctance variations of rotor position. It is independent from stator current. PM torque ripple is the result of the interaction between the high degree harmonics of magnet pole fluxes and stator flux.

In recent years, slitted core structures are frequently used on designing of electrical machines. Slit dimensions that used on several designs show different values. Additionally, it can be seen that slits are used on the stator cores or rotor cores or both for several electrical machine designs. Main purpose of the usage of the slits is smooth flux distribution on laminations or cores. It helps to decrease the leakage fluxes and helps the increase of useful flux that circulates in the core. There are many studies on this purpose in the literature.

Klima et. all have studied for increasing the performance of an induction motor in order to open the slits on induction motor's rotor core. It has been helped the decrease the additional rotor losses, torque ripple and undesirable magnetic forces. They have suggested that decreasing the rotor eddy current losses in order to use the slit number between 25 and 30. In terms of torque ripple, it can be chosen odd slit numbers like 27, 29 or 31 etc. From looking point of magnetic force, similarly it can be chosen odd slit numbers [17].

Nerg et. all have studied on a solid rotor induction motor. They have opened slits on solid rotor. They have examined on torque ripple and unbalanced magnetic interaction effect between stator and rotor

cores. They have showed that, odd number of rotor slits have effected on less torque ripple. Also, they have showed that the effect of loading on unbalanced magnetic interaction amplitude and odd slit number [18].

Yetgin and Turan have studied on 56 different 3 kW induction motor models and, they have showed that usage of optimal slit width and length from these models. According to this study, it has been showed to improve the maximum efficiency, optimum slit width can be chosen 0.1 mm and the optimum slit height can be chosen about core teeth height. For optimal dimensions of slits, they have showed that the increase on motor efficiency about 1.86 percent [19].

Viorel et. all have used slits for improving the synchronous reluctance motor performance [20]. Chan and Hamid have made an analogous study on switched reluctance motor structure. Results had indicated that a flattop current waveform and higher power could be achieved without an increase in peak current magnitude [21].

Li et. all have studied for decreasing the armature reaction of a hybrid excited machine implemented slits on rotor core. They have showed that the application help for decrease the eddy currents [22].

Slit widths and heights have an important effect on motor performance [23]. Geometrical aspects can be showed on Figure 2 [24].

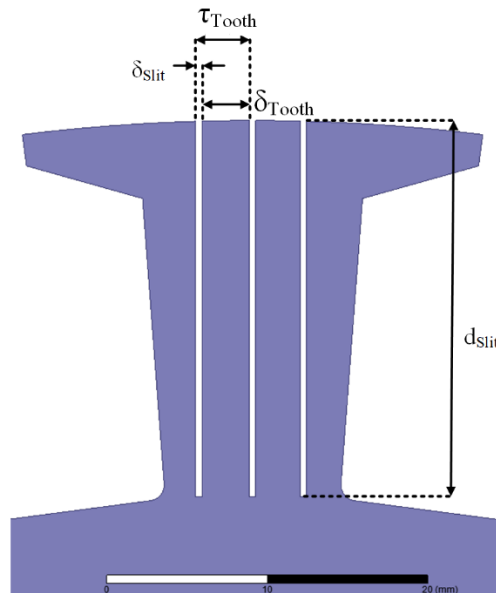


Figure 2. Establishing the slits on the core

According to Figure 2, there are two important equations to determine the rotor tooth pitch.

$$\tau_{tooth} = \frac{\pi \cdot D_r}{Q_r} \quad (4)$$

$$\tau_{tooth} = \delta_{tooth} + \delta_{slit} \quad (5)$$

Here, Q_r is the number of rotor slots, D_r is the diameter of the rotor, τ_{tooth} is the tooth pitch, δ_{tooth} is the tooth width, δ_{slit} is the slit width, and d_{slit} is the slit depth.

4. Simulation Study and Results

A prototype electric car traction motor has been designed and simulated in this study. Main purpose of this study, minimization of torque ripples and increasing the mean shaft torque of the PMSM motor. A

24 slot 22 pole PMSM hub motor is designed for prototype electric car traction system. Mean weight of the prototype electric car is about two hundred kilograms. Mean speed of the car is 50 kilometers per hour. For 16 inches tyre hubcap diameter, mean speed of the tyres are about 700 rpm. In these conditions, mean shaft power is about 2000 Watts for 100 V, 30 Ah battery supply.

To simulate the traction motor performance, a finite element method simulation programme is used [25]. A transient simulation is conducted for observing the torque ripples of the classical Hub PMSM and slitted stator Hub PMSM. Similarly, another observation is achieved on two of the models that have different shaft torques.

Figure 3 shows the two types of stator cores. First stator core is classical Hub PMSM and second stator core is the slitted stator core Hub PMSM of prototype electric car. Third equipment is the PM steel rotor core of the prototype electric car Hub PMSM. Dimensions of the stator cores of two types are same.

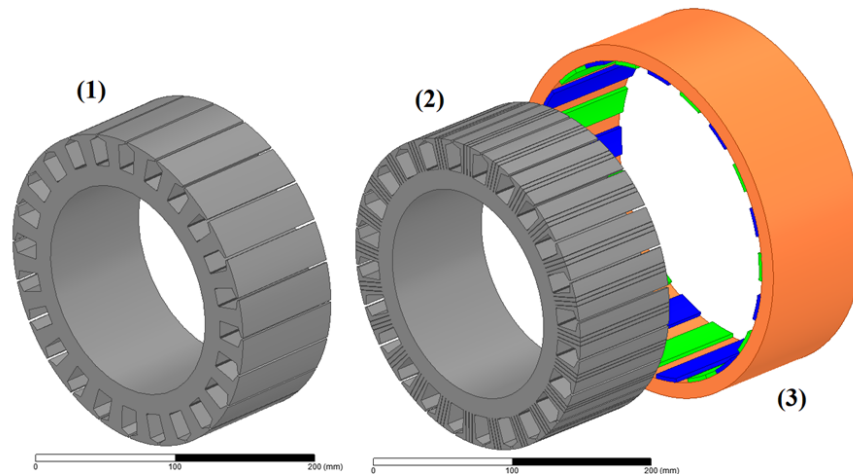


Figure 3. Two types of stator cores: Classical stator Hub PMSM (1), Slitted stator core Hub PMSM (2), PM steel rotor core of the prototype electric car Hub PMSM (3)

One rotor core and magnet poles has been used with the two of the stator cores. Same laminated material has been used on two of the stator cores. From the winding topology perspective, same concentrated winding topology has been used for two types of the stator cores. Figure 4 shows the mutual concentrated winding topology and mutual magnet poles of the two types of PMSMs. Similar conductor material and diameter have been used for winding structures.

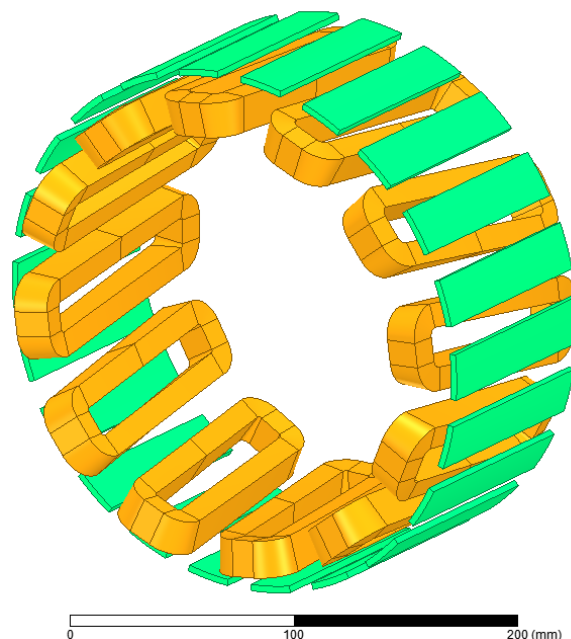


Figure 4. Mutual concentrated winding topology and mutual magnet poles of the two types of PMSMs

Transient dynamical analysis has been conducted for conventional Hub PMSM and slitted stator Hub PMSM and performance observation has been achieved on solutions of the transient analysis. Figure 5 shows the comparison between the different operation times of conventional Hub PMSM. First sample shows the flux density distribution of conventional Hub PMSM at starting up (0th second). Second sample shows the flux density distribution of conventional Hub PMSM at steady state condition (40th milliseconds). Flux density distributions show the saturated regions of stator cores upper areas of the teeth. There is no dangerous flux distribution at start-up time and steady state time zone.

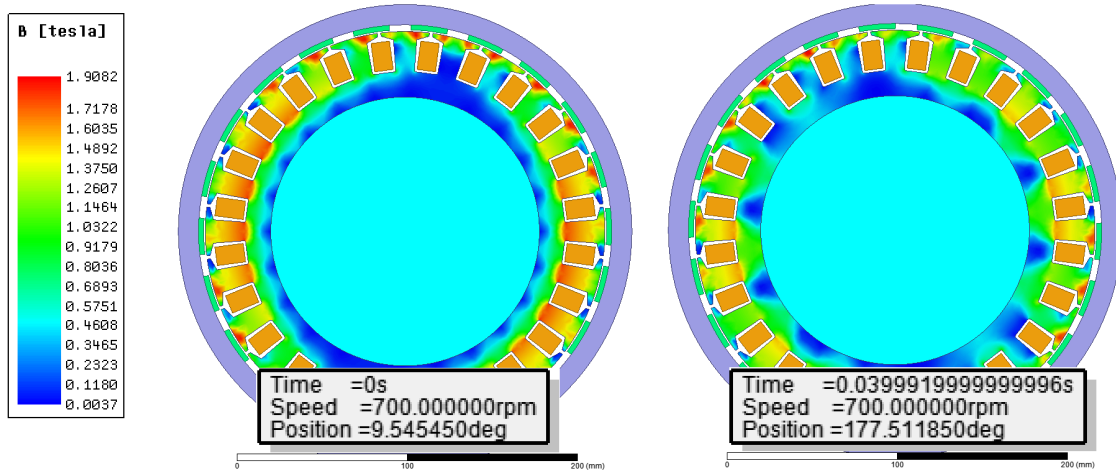


Figure 5. Comparison flux density distributions between the different operation times (1): Start-up position, (2): Steady state position of conventional PMSM

Figure 6 shows the comparison between the different operation times of slitted stator Hub PMSM. First sample shows the flux density distribution of slitted stator Hub PMSM at starting up (0th second). Second sample shows the flux density distribution of slitted stator Hub PMSM at steady state condition (40th milliseconds). Flux density distributions show the saturated regions of stator cores upper areas of the teeth. There is no dangerous flux distribution at start-up time and steady state time zone.

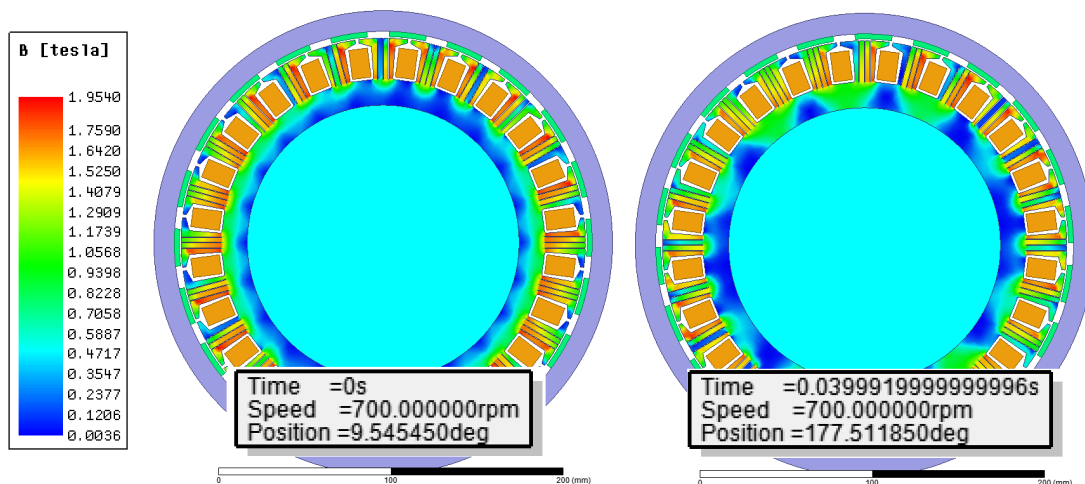


Figure 6. Comparison flux density distributions between the different operation times (1): Start-up position, (2): Steady state position of slitted stator PMSM

Finally, Figure 7 (a) shows torque and torque ripple performance for conventional Hub PMSM. Also Figure 7 (a) shows the starting up operation of conventional Hub PMSM. Figure 7 (b) shows the starting up operation of slitted stator Hub PMSM. When a comparison is made for two of the graphs, conventional Hub PMSM is operated with a 31 Nm average shaft torque value and about 33 percent torque ripple value. Although, slitted stator Hub PMSM is operated with a 34 Nm average shaft torque value and about 27 percent torque ripple value. Slitted stator Hub PMSM has showed better output shaft torque and torque ripple value with respect to conventional Hub PMSM.

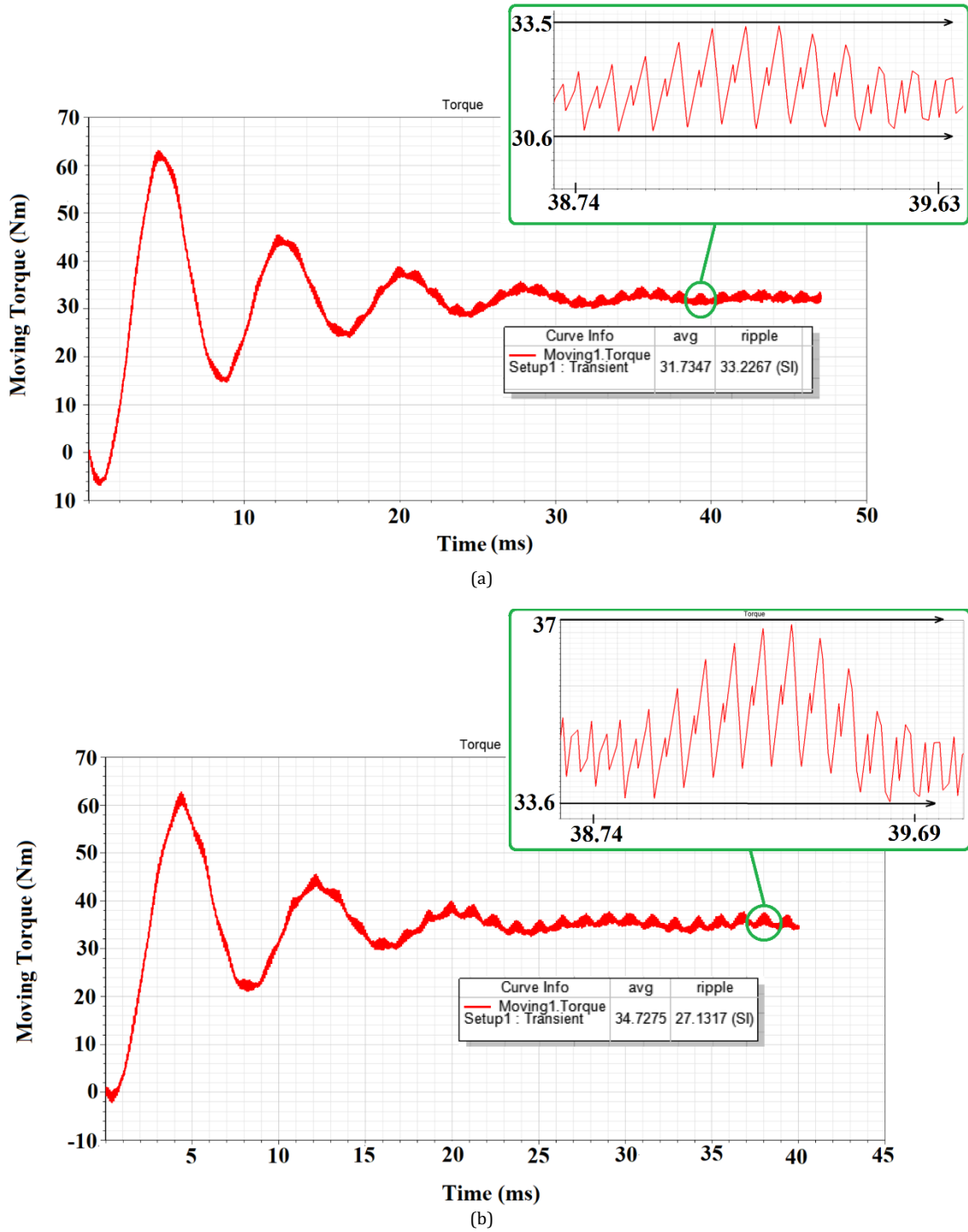


Figure 7. (a) Steady state torque and torque ripple performance and of conventional PMSM (b) Steady state torque and torque ripple performance and of slitted PMSM

In terms of the feasibility of the idea, a comparison can also be made between phase currents. Accordingly, the phase currents of classical and slitted PMSMs are compared in Figure 8 (a) and (b). The torque performance values in Figure 8 were obtained at the maximum phase current value of 42 A in the stable region.

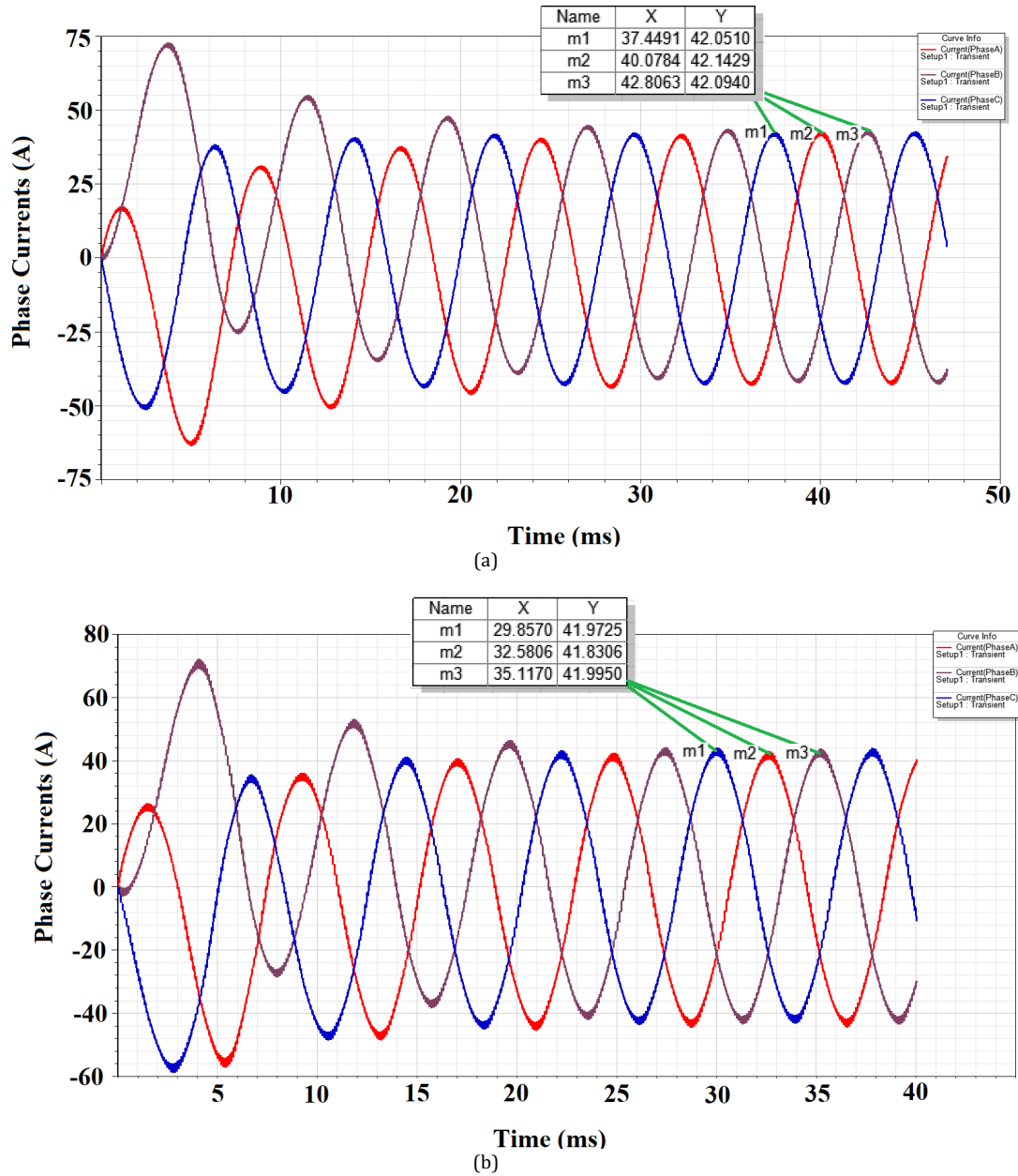


Figure 8. (a) Steady state phase currents performance of conventional PMSM (b) Steady state phase currents performance of slitted PMSM

When a detailed examination is made on the current graphs, it is seen that the phase currents of both models reach a maximum value of 42 A in the steady state region. Thus, it is seen that the current values obtained in the steady-state condition for the classical Hub PMSM and the slitted Hub PMSM are almost the same. From this point of view, it is seen that both the average torque value increased and the torque ripple value decreased with the proposed method without changing the current value per phase in the motor.

5. Conclusions

Slitted motor designs have been applied in many different types of motors such as solid rotor induction motor, induction motor, synchronous reluctance motor, hybrid excited machine in recent years. In this study, the slitted structure was applied to the PMSM motor.

A prototype electric car traction motor has been designed and simulated in this study. Main purpose of this study, minimization of torque ripples and increasing the mean shaft torque of the PMSM motor. A new method has been suggested for minimizing the cogging torque value on PMSMs in this study. In this method, slits have been implemented on PMSM stator teeth. Main purpose of this implementation,

occurring an extra reluctance in airgap region of the motor and providing the penetration of the smooth flux outer surface region of stator core.

In order to correct implementation of the slits on teeth, slit widths have been chosen 0.1 mm and slit heights have been chosen sum of the height of stator teeth and magnet height. According to this study, conventional and slitted stator core structures have been examined. It has been showed that, 6 percent better output torque ripple and 3 Nm extra output shaft torque achieved for slitted stator structure with respect to conventional stator structure of Hub PMSM.

Acknowledgement

This study has been supported by Kütahya Dumlupınar University Scientific Research Projects Dept.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] B. Adhavan, M. S. Birundha, C. S. Ravichandran and V. Jagannathan, "Torque ripple reduction in permanent magnet synchronous motor using fuzzy logic control," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, pp. 61-68, 2013.
- [2] R. Abdelmoula, N. B. Hadj, M. Chaieb and R. Neji, "Reducing torque ripples in permanent magnet synchronous motor," *Journal of Electrical Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 528-542, September 2017.
- [3] I. Benhamida, A. Ameer, K. Kouzi and B. Gaoui, "Torque ripple minimization in predictive torque control method of pmsm drive using adaptive fuzzy logic modulator and ekf estimator," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 30, pp. 1007-1018, 2019. doi:10.1007/s40313-019-00505-7
- [4] S. Brock and J. Deskur, "A practical approach to compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives," *Proc. Of the Int. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics*, Dubrovnik, Croatia, September 26 – 28, 2005.
- [5] G. Dajaku and D. Gerling, "New methods for reducing the cogging torque and torque ripples of pmsm," *Proc. of the 4th Int. Electric Drives Production Conference, EDPC 2014*, Nuremberg, Germany, 30 September-01 October 2014.
- [6] P. Yi, X. Wang, Z. Zhou and Z. Sun, "Optimization and implementation of three-phase pmsm current harmonic decomposition technique," *SAE Technical Paper*, vol. 2019-01-0604, pp. 1-8, 2019. doi:10.4271/2019-01-0604
- [7] T. Yan, Q. Liu, B. Dou, Q. Li and B. Li, "An adaptive dynamic programming method for torque ripple minimization of pmsm," *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 17, no. 2, pp. 827-839, March 2021. doi:10.3934/jimo.2019136
- [8] R. Tao, J. Ma and H. Zhao, "Torque ripple minimization in pmsm based on an indirect adaptive robust controller," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, pp. 1-10, October 2017. doi:10.1155/2017/9512351
- [9] M. H. Hwang, H. S. Lee and H. R. Cha, "Analysis of torque ripple and cogging torque reduction in electric vehicle traction platform applying rotor notched design," *Energies*, vol. 11, pp. 1-14, November 2018. doi:10.3390/en11113053
- [10] H. M. Hasanien, "Torque ripple minimization of permanent magnet synchronous motor using digital observer controller," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 1, pp. 98-104, January 2010. doi:10.1016/j.enconman.2009.08.027
- [11] D. Flieller, N. K. Nguyen, P. Wira, G. Sturtzer, D. O. Abdeslam and J. Merckle, "A self-learning solution for torque ripple reduction for non-sinusoidal permanent magnet motor drives based on artificial neural networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 2, pp. 655-666, February 2014. doi:10.1109/TIE.2013.2257136
- [12] R. Ilka, Y. A. Beromi and H. Yaghobi, "Cogging torque reduction of permanent magnet synchronous motor using multi-objective optimization," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 153, pp. 83-95, 2018. doi:10.1016/j.matcom.2018.05.018
- [13] A. J. Ali, A. H. Ahmed and B. M. Saied, "Cogging torque mitigation for pmsm using stator slots design and magnets skewing," *2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering ICECCPCE19*, Mosul, Iraq, 13-14 February 2019, pp. 240-245, 2019. doi:10.1109/ICECCPCE46549.2019.203781
- [14] X. Duan, X. Zhang, Y. Tang and M. Hao, "Cogging torque reduction in pmsm in wide temperature range by response surface methodology," *Symmetry*, vol. 13, pp. 1-17, 2021. doi:10.3390/sym13101877
- [15] K. Abbaszadeh and S. Maroufian, "Cogging torque reduction in pmsm motor by using proposed new auxiliary winding," *Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)*, vol. 46, no. 1, pp. 11-17, Spring 2014. doi:10.22060/eej.2014.436
- [16] Y. Yu, Y. Pan, Q. Chen, D. Zeng, Y. Hu, H. H. Goh, S. Niu and Z. Zhao, "Cogging torque minimization of surface-mounted permanent magnet synchronous motor based on rsm and nsga-II," *Actuators*, vol. 11, pp. 1-13, 2023. doi:10.3390/act11120379
- [17] J. Klima, J. Nerg, J. Barta and O. Vitek, "The impact of the rotor slit number on the behavior of high-speed induction motor," *Przegld Elektrotechniczny*, vol. R. 94 NR 5/2018, pp. 7-13, 2018. doi:10.15199/48.2018.05.02
- [18] J. Nerg, T. Aho and J. Pyrhönen, "Effect of odd number of rotor slits on the performance of a high-speed, high-power, solid-rotor induction motor," *Proc. of the 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, December 16-18, pp. 100-105, 2006.

- [19] A. G. Yetgin and M. Turan, "Efficiency optimization of slitted-core induction motor," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 1, pp. 60–64, January 2014. doi:10.2478/jee-2014-0009
- [20] I. A. Viorel, I. Husain, I. Chişu, H. C. Hedeşiu, G. Madescu and L. Szabo, "Reluctance synchronous machine with a particular cageless segmental rotor," *Proc. of the Int. Conf. on Electrical Machines, ICEM 2002*, pp. 1-6, 2002.
- [21] S. Chan and M. N. Hamid, "Finite-element study on a two-phase switched reluctance motor with split rotor poles," *Proc. of the Int. Conf. on Power Electronics and Drives Systems, IEEE PEDS 2005*, 28 November-1 December 2005, pp. 1156-1160, 2005.
- [22] L. Li, A. Foggia, A. K. Lebouc, J. C. Mipo and L. Kobylansky, "Some armature reaction compensation methods numerical design of experiments and optimization for a hybrid excitation machine," *Proc. of the Int. Electric Machines and Drives Conference, 2009 IEEE*, Miami, FL, USA, 03-06 May 2009, pp. 832-838, 2009.
- [23] M. O. Gulbahce, D. T. McGuinness and D. A. Kocabas, "Shielded axially slitted solid rotor design for high-speed solid rotor induction motors," *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 9, pp. 1371-1377, November 2018. doi:10.1049/iet-epa.2018.5210
- [24] M. O. Gülbahçe, "Contributions to reduce rotor harmonic losses in solid rotor induction machine for high speed drive applications," Ph.D. dissertation, Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering And Technology, Istanbul, Türkiye, June 2019.
- [25] Ansys Electronics Desktop 2018.2.0.

* This article is an extended version of the paper presented at the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'22).

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Classification of Distortions in Agricultural Images Using Convolutional Neural Network

Şafak Altay Açar^{a*}

Submitted: 17.02.2023 Revised: 09.07.2023 Accepted: 15.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705062

ABSTRACT

Keywords: Distortion classification, Agricultural image, Convolutional neural network

^{a,*} Karabük University,
Yenice Vocational School,
Dept. of Computer Technologies
78700 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6502-7456
e mail: safakaltay@karabuk.edu.tr

*Corresponding author:
safakaltay@karabuk.edu.tr

Monitoring products is important for quality and ripening control in an efficient agricultural production process. Monitoring is mostly done with captured images and videos in accordance with the developed technology. The quality of these images and videos directly affects the evaluation. If there is a distortion in image or video, first of all, this distortion must be detected and classified to eliminate. In this study, a method is presented to classify distortions in agricultural images. Eleven different distortions are synthetically added to agricultural images. A convolutional neural network (CNN) is designed to classify distorted images. The designed CNN model is tested with four different datasets obtained from various agricultural fields. Also the designed CNN model is compared with previously presented CNN architectures. The results are evaluated and it is seen that the designed CNN model successfully classifies distortions.

Evrişimli Sinir Ağı Kullanarak Tarımsal Görüntülerdeki Bozulmaları Sınıflandırma

ÖZ

Ürünlerin izlenmesi, etkili bir tarımsal üretim sürecinde kalite ve olgunlaşma kontrolü için önemlidir. İzleme, gelişen teknolojiye uygun olarak çoğunlukla çekilen görüntü ve videolarla yapılmaktadır. Bu görüntü ve videoların kalitesi değerlendirmeyi doğrudan etkilemektedir. Görüntü veya video da bir bozulma varsa, öncelikle bu bozulmanın ortadan kaldırılması için tespit edilmesi ve sınıflandırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, tarımsal görüntülerdeki bozulmaları sınıflandırılmak için bir yöntem sunulmaktadır. On bir farklı bozulma tarımsal görüntülere sentetik olarak eklenmiştir. Bozuk görüntüleri sınıflandırmak için bir evrişimli sinir ağı (ESA) tasarlanmıştır. Tasarlanan ESA modeli, çeşitli tarım alanlarından elde edilen dört farklı veri seti ile test edilmiştir. Ayrıca tasarlanan ESA modeli daha önce sunulan ESA mimarileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirilmiş ve tasarlanan ESA modelinin bozulmaları başarıyla sınıflandırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bozulma sınıflandırma, Tarımsal görüntü, Evrişimli sinir ağı

1. Introduction

Image distortions may occur due to various reasons during or after acquisition. When it is necessary to analyse and use the information obtained from the image, these distortions affect the information undesirably. Distortion classification is one of the processes that supports image restoration and image quality assessment (IQA).

Many academic studies examining or using distortion classification are presented. Chetouani et al. [1] propose an image quality estimation approach. The proposed method classifies distortions by using linear discriminant analysis to decide optimal image quality measure. They obtain around 15% better results. Lee and Kim [2] present a new IQA method based on distortion classification and a new metric. The presented method achieves better results than the other 15 existing methods. Alaql et al. [3] examine different classification techniques and different features for image distortions. Multiclass classifier with logistic regression is determined as best performing. They state that the proposed model outperforms state-of-the-art classification methods. Wang et al. [4] suggest a CNN based method to recognize distortion and evaluate image quality. The proposed method is superior to several state-of-the-art methods according to the results. A new image distortion classification algorithm which uses the generalized Benford's law is proposed by Al-Bandawi and Deng [5]. Based on experimental results, the proposed algorithm outperforms existing ones. Ha et al. [6] introduce a new selective deep convolutional neural network to classify distorted images. An extra small CNN is improved to recognize distortion type and degree. Introduced network performs up to 2.18x better than the previous state-of-the-art deep convolutional neural networks. Messai et al. [7] propose an approach which recognizes the type of distortion in stereoscopic images. Support vector machine is used to identify distortion type. Proposed classifier provides good accuracy. Buczkowski and Stasiński [8] present two different CNN architectures for distortion classification. Both CNNs have better results than the method which they compared. Liang et al. [9] suggest a deep multitask CNN model to identify image distortion. They state that the algorithm performs well on several databases. An IQA strategy for laparoscopic images is proposed by Khan et al. [10]. Neural network is used for distortion classification and quality ranking. Encouraging results are obtained. The potential of deep visual representations to characterize image distortions is examined by Bianco et al. [11]. The results show that deep visual representations are useful for this process. Roccapiore et al. [12] introduce a study which identifies and corrects distortions in scanning transmission electron microscopy. Zhang et al. [13] propose a quality assessment approach that includes distortion analysis for distorted stereoscopic images. As compared with other state-of-the-art algorithms, proposed method performs better on several 3-dimension image datasets. Yan et al. [14] present a no-reference IQA study consisting of distortion identification and targeted quality evaluation. They state that the proposed method outperforms state-of-the-art no-reference IQA methods. Liang et al. [15] suggest a distortion analysis algorithm for image processing systems. Experimental results show that proposed algorithm is effective. Wang et al. [16] propose a method for image restoration. The type and level of distortion is detected then this information is used for image restoration process. A superior performance is achieved by the proposed method. Fazlali et al. [17] present a study which removes rain streaks and snow particles in images by using CNN based distortion classifier as a part of method. They get better results than existing methods. A no-reference IQA study is proposed by Xu and Jiang [18]. They use a perception-based distortion classification method in their study that provides a good performance. Li et al. [19] introduce a multi-channel attention network to classify underwater degraded images. The proposed network achieves 98.737% classification accuracy.

In agricultural fields, the use of technological tools becomes increasingly important. Especially, images acquired from fixed cameras or cameras placed on moving vehicles such as drone and robot are used to solve many problems. Silva et al. [20,21] present studies that classify and recognize distortions in agricultural images acquired by unmanned aerial vehicle. CNN is used in both studies. In [20], synthetically generated linear distortions are classified among themselves according to the parameters from which they are created. In [21], non-linear distortion is recognized.

In this study, a method is presented to classify distortions in agricultural images. Firstly, eleven different distortions are applied to images from four datasets. Then, a designed CNN model classifies distorted images. Obtained results are evaluated and designed CNN model is compared with previously presented CNN architectures.

The contributions of the proposed work can be listed as:

- It is a comprehensive study on the classification of distortions in agricultural images.
- Four different datasets obtained from various agricultural fields are used. Also, these datasets were created by using various acquisition tools. In this context, it is a highly valid study.
- It evaluates not only the distortions frequently used in the literature, but also the distortions that can be caused by mobile vehicles such as unmanned aerial vehicles.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 presents materials and method. Section 3 introduces experimental results and evaluations. Conclusion is addressed in Section 4.

2. Materials and Method

Used datasets, applied distortions and convolutional neural network model are explained in detail under different headings in this section.

2.1. Agricultural image datasets

Four different datasets with various contents are used in this study. Information about the existence of the first three datasets was obtained from [22].

The first one is Plant Seedlings dataset [23] created with the help of a stable ground platform. This dataset contains total 5544 images with 12 different plant classes which are maize, common wheat, sugar beet, scentless mayweed, common chickweed, shepherd's purse, cleavers, charlock, fat hen, cranesbill, black-grass and loose silky-bent. Also, resolutions of images range from 49x49 to 3991x3457 pixels. Samples from the dataset are shown in Fig. 1.

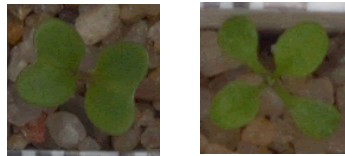


Figure 1. Samples from Plant Seedlings dataset [23]

The second is MinneApple dataset [24]. This dataset consists of apple tree images taken with a mobile phone camera. 1000 image pieces with 200x200 pixels resolution were cropped from dataset images. These images focused on apples on trees are used in the study. Cropped samples from the dataset are shown in Fig. 2.



Figure 2. Cropped samples from MinneApple dataset [24]

The third is DeepFruits dataset [25] which has total 584 images of 7 different kinds of fruit. These kinds are apple, avocado, capsicum, mango, orange, rock melon and strawberry. Resolutions of images range from 128x96 to 4000x3000 pixels. Also, this dataset was created by using a ground based platform. Samples from the dataset are shown in Fig. 3.



Figure 3. Samples from DeepFruits dataset [25]

The fourth is CoFly-WeedDB dataset [26]. This dataset consists of images obtained from the flight of an unmanned aerial vehicle over a cotton field which has weeds. 1830 image pieces with 200x200 pixels resolution were cropped from dataset images to use. Cropped samples from the dataset are shown in Fig. 4.

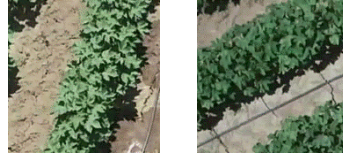


Figure 4. Cropped samples from CoFly-WeedDB dataset [26]

In this study, second and third datasets are used combining. Eleven different distortions are applied separately to each image in the datasets. Total number of images in the datasets, including new created ones, is given in Table 1.

Table 1. Total number of images in the datasets

Dataset	Number of images in each class	Total number of images
Plant Seedlings	5544	66528
MinneApple&DeepFruits	1584	19008
CoFly-WeedDB	1830	21960

2.2. Distortions

Eleven types of distortion are examined. These are Gaussian noise, white&black noise, Gaussian blur, low brightness, high brightness, rotation right, rotation left, translation right&down, translation left&up, distorted perspective 1 and distorted perspective 2. Rotation, translation and perspective distortions are selected inspired by [20]. Each of these distortions was synthetically added to the images in datasets by a developed software. Thus, eleven different distorted images were generated from each original image.

2.2.1. Gaussian noise

Gaussian noise is applied to images by using Gaussian probability distribution [27] defined in Eq. (1). Mean (μ) and standard deviation (σ) values are chosen as 0 and 0.5 respectively.

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

2.2.2. White&black noise

Pixels selected randomly at the rate of 5% from the images are transformed into white colour or black colour to create noises. The ratio of white pixels and black pixels is set to the equal in this process. This type of noise is named as white&black noise in this study.

2.2.3. Gaussian blur

13x13 kernel calculated by using Eq. (2) [28] is used for Gaussian blur. Standard deviation (σ) is determined as 1.

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

2.2.4. Low brightness and high brightness

Brightness of images is changed by increasing or decreasing colour values of pixels. In this study, colour values of pixels are decreased or increased by 40 units to achieve low brightness or high brightness.

2.2.5. Rotation right and rotation left

Rotated images are obtained by rotating original images to the right or left. The angle of rotation is set 15° for this process.

2.2.6. Translation right&down and translation left&up

First type of translated image is created by translating original images right and down. Second type is created by translating original images left and up. In these processes, translated amount is 30 pixels for both directions.

2.2.7. Distorted perspective 1 and distorted perspective 2

These types of distortions are generated by distorting the perspective of original images in two different ways.

After rotation, translation and distorting perspective processes, pixel colour losses occur in the images. These losses are recovered by using average colour values of other pixels. Sample of original image from CoFly-WeedDB dataset [26] and distorted images generated from it are shown in Fig. 5.

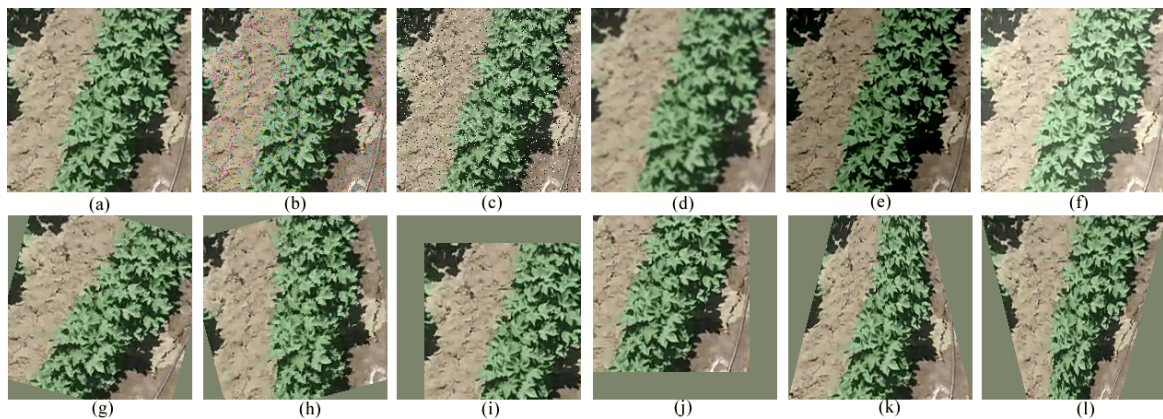


Figure 5. Sample of original image from CoFly-WeedDB dataset [26] and distorted images generated from it (a) original (b) Gaussian noise (c) white&black noise (d) Gaussian blur (e) low brightness (f) high brightness (g) rotation right (h) rotation left (i) translation right&down (j) translation left&up (k) distorted perspective 1 (l) distorted perspective 2

2.3. Convolutional neural network model

Convolutional neural networks are developed in accordance with the use of grid structured inputs such as two dimensional images [29]. In this study, a CNN model is designed to classify distorted agricultural images. The designed CNN model has 4 convolutional layers and 2 max pooling layers in the part of feature extraction. 3x3 kernel and ReLU activation function are used in all convolution layers but each convolution layer contains different number of filters. First two convolution layers which include 24 and 32 filters respectively are added back to back. A max pooling layer implemented using 2x2 kernel follows them. Third convolution layer has 64 filters and second max pooling layer follows it. Finally, fourth convolution layer has 72 filters. In the classifier part, there are 3 dense layers. First two dense layers have 96 neurons and ReLU activation function. Third dense layer is output layer. It has 12 neurons because there are a total of 12 classes representing 1 clean and 11 distorted images. Also, softmax is determined as activation function. Architecture of the designed CNN model is shown in Fig. 6.

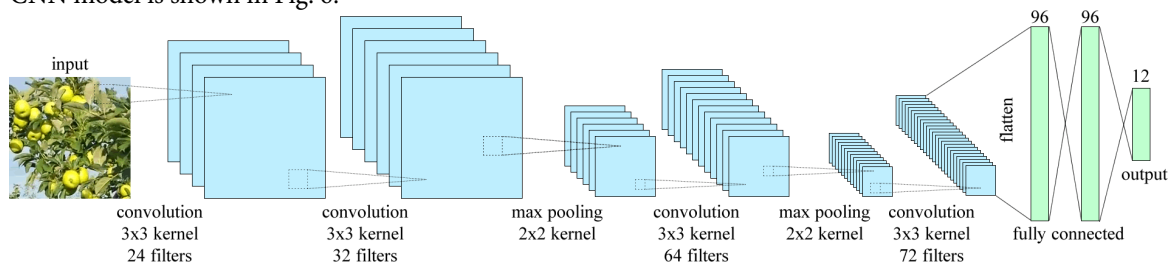


Figure 6. Architecture of the designed CNN model

3. Experimental Results

Two different experiments were carried out and the results were evaluated. In the first one, the proposed CNN

model was tested with agricultural image datasets. Input image dimensions, number of outputs, number of epochs and number of steps per epoch were determined as 150x150 pixels, 12, 20 and 400 respectively. The datasets were divided into 3 parts: 70% train, 10% validation and 20% test. Accuracy values were calculated separately. The obtained accuracy values are given in Table 2. When accuracy values in Table 2 are examined, it is seen that train accuracy values are close together. For each dataset, train accuracy value is higher than validation and test accuracy values. The dataset created by combining MinneApple dataset [24] and DeepFruits dataset [25] has slightly lower validation and test accuracy values than others.

Table 2. Accuracy values of the proposed CNN model

Dataset	Train accuracy	Validation accuracy	Test accuracy
Plant Seedlings	0.9984	0.9706	0.9731
MinneApple&DeepFruits	0.9975	0.9468	0.9331
CoFly-WeedDB	0.9979	0.9913	0.9877

Accuracy vs. epoch graphs and loss vs. epoch graphs formed during training for each dataset are shown in Fig. 7, Fig. 8 and Fig. 9.

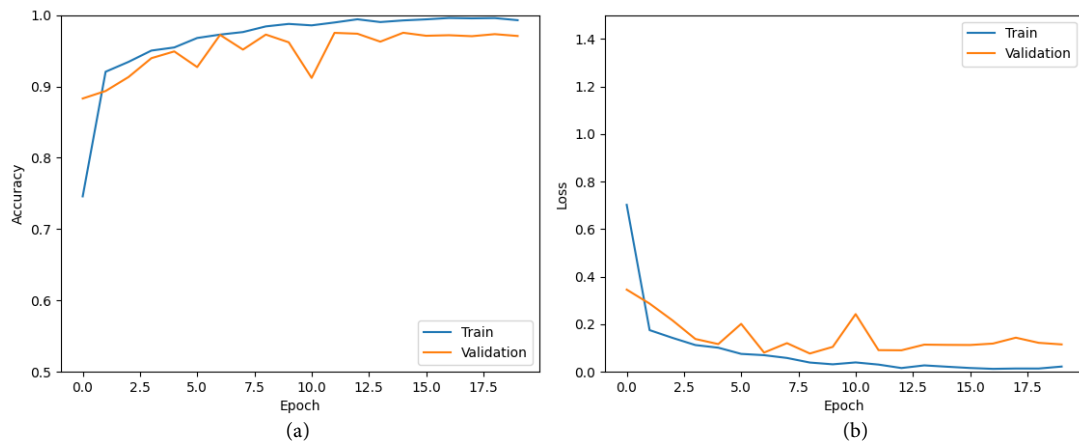


Figure 7. (a) Accuracy vs. epoch graph (b) loss vs. epoch graph of Plant Seedlings dataset [23]

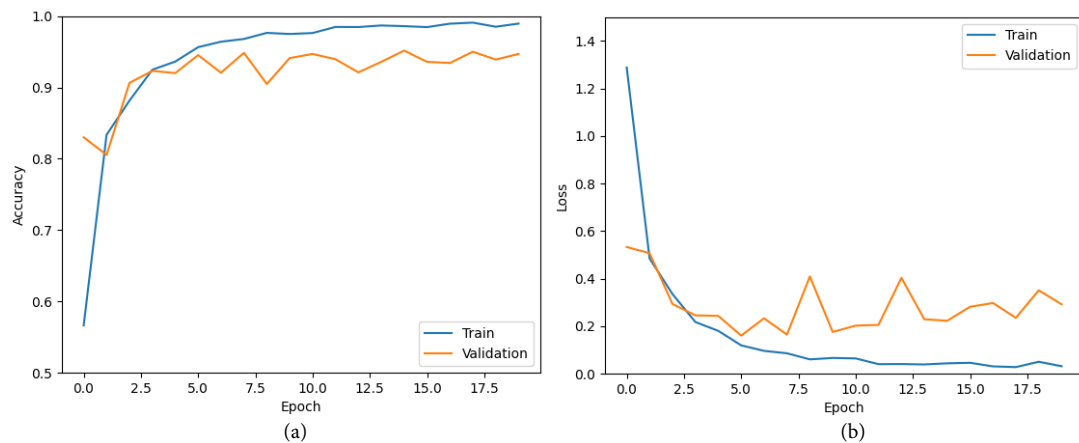


Figure 8. (a) Accuracy vs. epoch graph (b) loss vs. epoch graph of MinneApple[24]&DeepFruits [25] dataset

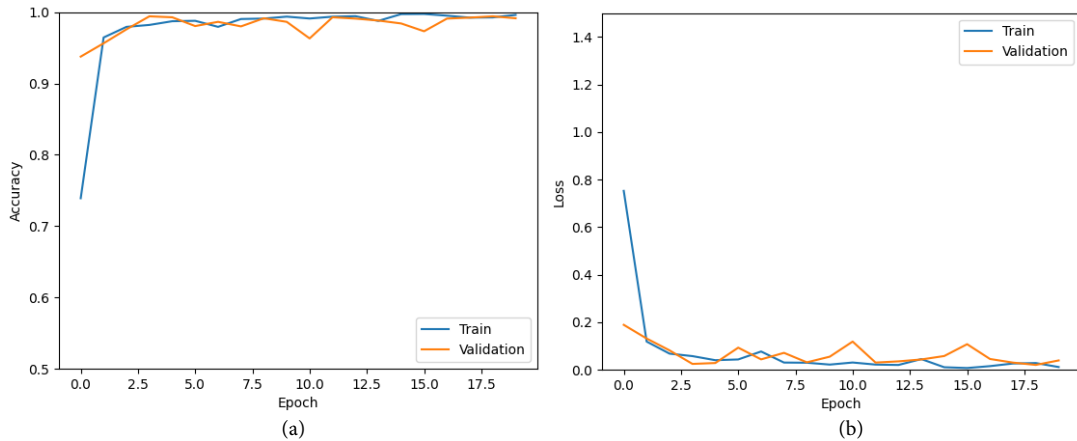


Figure 9. (a) Accuracy vs. epoch graph (b) loss vs. epoch graph of CoFly-WeedDB [26] dataset.

In the second experiment, the proposed CNN model was compared with LeNet-5 [30], AlexNet [31] and VGG-11 [32]. Simple and less layered architectures such as the proposed CNN model were preferred for comparison. The dataset created by combining MinneApple dataset [24] and DeepFruits dataset [25] was used in the experiment. Unlike the first experiment, number of steps per epoch was determined as 50. Other experiment settings were not changed. The accuracy values and total number of parameters are given in Table 3. The results illustrate that LeNet-5 [30] has the lowest accuracy values. Proposed CNN model has higher accuracy values than LeNet-5 [30] and AlexNet [31]. In addition to the network architecture, variables such as kernel size and activation function affect the success of the network. This situation is effective in obtaining these results. Also, the proposed CNN model has the highest train accuracy value but VGG-11 [32] has the highest validation and test accuracy values. Proposed CNN model and VGG-11 [32] have close accuracy values but their total number of parameters which affects processing time is very different. VGG-11 [32] has more parameters and processing time.

Table 3. Accuracy values and total number of parameters of CNN models.

CNN model	Train accuracy	Validation accuracy	Test accuracy	Total number of parameters
LeNet-5	0.1294	0.1273	0.1217	9,124,096
AlexNet	0.6501	0.6470	0.6336	30,024,460
VGG-11	0.9688	0.9510	0.9510	59,609,484
Proposed	0.9922	0.9189	0.9176	7,605,396

4. Conclusion

In this study, a CNN-based classification method for distortions in agriculture images is presented. In order to make this work comprehensive, four different datasets obtained from various agricultural fields and eleven different distortion types were used. Also, the CNN model was designed to be simple in order to save process time. Two different experiments were set to test the designed CNN model. In the first one, the designed CNN model classified distortions in each dataset. In the second one, the designed CNN model was compared with LeNet-5 [30], AlexNet [31] and VGG-11 [32]. According to the results obtained from both experiments, the designed CNN model has high accuracy values.

This study will support future studies on distortion classification, convolution neural networks and agricultural images.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] A. Chetouani, A. Beghdadi and M. Deriche, "A hybrid system for distortion classification and image quality evaluation," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 27, no. 9, pp. 948-960, October 2012. doi:10.1016/j.image.2012.06.001

- [2] J.-Y. Lee and Y.-J. Kim, "Optimal image quality assessment based on distortion classification and color perception," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 257-271, January 2016. doi:10.3837/tiis.2016.01.015
- [3] O. Alaql, K. Ghazinour and C. C. Lu, "Classification of image distortions for image quality assessment," in *Proc. of International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, 15-17 December 2016, Las Vegas, NV, USA* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7881422>. [Accessed: 20 Sept. 2022].
- [4] H. Wang, L. Zuo and J. Fu, "Distortion recognition for image quality assessment with convolutional neural network," in *Proc. of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 11- 15 July 2016, Seattle, WA, USA* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7552936>. [Accessed: 20 Sept. 2022].
- [5] H. Al-Bandawi and G. Deng, "Classification of image distortion based on the generalized Benford's law," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, pp. 25611-25628, May 2019. doi:10.1007/s11042-019-7668-3
- [6] M. Ha, Y. Byun, J. Kim, J. Lee, Y. Lee and S. Lee, "Selective deep convolutional neural network for low cost distorted image classification," *IEEE Access*, vol 7, pp. 133030-133042, September 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939781
- [7] O. Messai, F. Hachouf and Z. A. Seghir, "Automatic distortion type recognition for stereoscopic images," in *Proc. of International Conference on Advanced Electrical Engineering, 19-21 November 2019, Algiers, Algeria* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9015082>. [Accessed: 20 Sept. 2022].
- [8] M. Buczkowski and R. Stasiński, "Convolutional neural network-based image distortion classification," in *Proc. of International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 5-7 June 2019, Osijek, Croatia* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8787212>. [Accessed: 20 Sept. 2022].
- [9] D. Liang, X. Gao, W. Lu and L. He, "Deep multi-label learning for image distortion identification," *Signal Processing*, vol. 172, p. 107536, July 2020. doi:10.1016/j.sigpro.2020.107536
- [10] Z. A. Khan, A. Beghdadi, M. Kaaniche and F. A. Cheikh, "Residual networks based distortion classification and ranking for laparoscopic image quality assessment," in *Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, 25-28 October 2020, Abu Dhabi, United Arab Emirates* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9191111>. [Accessed: 20 Sept. 2022].
- [11] S. Bianco, L. Celona and P. Napoletano, "Disentangling image distortions in deep feature space," *Pattern Recognition Letters*, vol. 148, pp.128-135, August 2021. doi:10.1016/j.patrec.2021.05.008
- [12] K. M. Roccapriore, N. Creange, M. Ziatdinov and S. V. Kalinin, "Identification and correction of temporal and spatial distortions in scanning transmission electron microscopy," *Ultramicroscopy*, vol. 229, p. 113337, October 2021. doi:10.1016/j.ultramic.2021.113337
- [13] Y. Zhang, D.M. Chandler and X. Mou, "Quality assessment of multiply and singly distorted stereoscopic images via adaptive construction of cyclopean views," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 94, p. 116175, May 2021. doi:10.1016/j.image.2021.116175
- [14] C. Yan, T. Teng, Y. Liu, Y. Zhang, H. Wang and X. Ji, "Precise no-reference image quality evaluation based on distortion identification," *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, vol. 17, no. 3s, pp. 110:1-110:21, November 2021. doi:10.1145/3468872
- [15] D. Liang, X. Gao, W. Lu and J. Li, "Systemic distortion analysis with deep distortion directed image quality assessment models," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 109, p. 116870, November 2022. doi:10.1016/j.image.2022.116870
- [16] Y. Wang, H. Li and S. Hou, "Distortion detection and removal integrated method for image restoration," *Digital Signal Processing*, vol. 127, p. 103528, July 2022. doi:10.1016/j.dsp.2022.103528
- [17] H. Fazlali, S. Shirani, M. Bradford, T. Kirubarajan, "Single image rain/snow removal using distortion type information," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, pp. 14105-14131, February 2022. doi: 10.1007/s11042-022-12012-0
- [18] L. Xu and X. Jiang, "Blind image quality assessment by pairwise ranking image series," *China Communications*, 2023. doi:10.23919/JCC.2023.00.102
- [19] G. Li, F. Wang, L. Zhou, S. Jin, X. Xie, C. Ding, X. Pan, W. Zhang, "MCANet: Multi-channel attention network with multi-color space encoder for underwater image classification," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 108, p. 108724, May 2023. doi:10.1016/j.compeleceng.2023.108724
- [20] L. H. F. P. Silva, J. D. Dias Júnior, J. F. B. Santos, J. F. Mari, M. C. Escarpinati and A. R. Backes, "Classification of UAVs' distorted images using convolutional neural networks," in *Proc. of XVI Workshop de Visão Computacional, October 2020* [Online]. Available: ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/344775288_Classification_of_UAVs'_distorted_images_using_Convolutional_Neural_Networks. [Accessed: 12 Agu. 2022].
- [21] L. H. F. P. Silva, J. D. Dias Júnior, J. F. B. Santos, J. F. Mari, M. C. Escarpinati and A. R. Backes, "Non-linear distortion recognition in UAVs' images using deep learning," in *Proc. of 16th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, January 2021* [Online]. Available: ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/349381713_Non-linear_Distortion_Recognition_in_UAVs'_Images_using_Deep_Learning. [Accessed: 12 Agu. 2022].
- [22] Y. Lu and S. Young, "A survey of public datasets for computer vision tasks in precision agriculture," *Computers and Electronics in*

Agriculture, vol. 178, p. 105760, November 2020. doi:10.1016/j.compag.2020.105760

[23] T. M. Giselsson, R. N. Jørgensen, P. K. Jensen, M. Dyrmann and H. S. Midtby, "A public image database for benchmark of plant seedling classification algorithms," *arXiv preprint, 15 November 2017* [Online]. Available: arXiv, <https://arxiv.org/abs/1711.05458>. [Accessed: 7 Sept. 2022].

[24] N. Häni, P. Roy and V. Isler, "MinneApple: a benchmark dataset for apple detection and segmentation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 852-858, January 2020. doi:10.1109/LRA.2020.2965061

[25] I. Sa , Z. Ge, F. Dayoub, B. Uproft, T. Perez and C. McCool, "DeepFruits: a fruit detection system using deep neural networks," *Sensors*, vol. 16, no. 8, August 2016. doi:10.3390/s16081222

[26] M. Krestenitis, E. K. Raptis, A. Ch. Kapoutsis, K. Ioannidis, E. B. Kosmatopoulos, S. Vrochidis and I. Kompatsiaris, "CoFly-WeedDB: A UAV image dataset for weed detection and species identification," *Data in Brief*, vol. 45, p. 108575, December 2022. doi:10.1016/j.dib.2022.108575

[27] W. Burger and M. J. Burge, *Digital Image Processing: An algorithmic introduction using java*, Second Edition, Springer-Verlag London, 2016, p. 756.

[28] W. Burger and M. J. Burge, *Digital Image Processing: An algorithmic introduction using java*, Second Edition, Springer-Verlag London, 2016, p. 423.

[29] C. C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning: A textbook*, Springer International Publishing AG, 2018, p. 315.

[30] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324, November 1998. doi:10.1109/5.726791

[31] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," in *Proc. of NIPS*, 2012 [Online]. Available: NeurIPS Proceedings, https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2012. [Accessed: 22 Dec. 2022].

[32] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," in *Proc. of ICLR, 2015* [Online]. Available: arXiv, <https://arxiv.org/abs/1409.1556v6>. [Accessed: 22 Dec. 2022].

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Comparative Analysis of Composite Buildings Produced in National and International Standards

Serkan Etli^a, Melek Akgül^{*b}

Submitted: 20.01.2023 Revised: 04.05.2023 Accepted: 05.05.2023 doi:10.30855/gmbd.0705063

ABSTRACT

Keywords: Composite moment resisting frame, Concrete filled steel tube column, Incremental dynamic analysis, Nonlinear pushover analysis, Seismic behavior factor

^a Munzur University
, Dep. of Emergency Aid
and Disaster Management,
062000 - Tunceli, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3093-4106
e mail: melekakgul@munzur.edu.tr

^{b*} Munzur University,
Tunceli Vocational Schools,
62000 - Tunceli, Turkey
Orcid: 0000-0001-8815-3762

*Corresponding author:
melekakgul@munzur.edu.tr

Composite moment resisting frame buildings with 5-, 10-, 15- and 20-story concrete filled steel tube columns and composite beams were modelled. The buildings are designed according to Turkish Code for Design and Construction of Steel Structures-2016 (TCDCSS-2016) and Türkiye Building Earthquake Code-2018 (TBEC-2018) regulations at high ductility levels. The design of the DCH structures was designed in ZC ground for a 0.79 g PGA. While choosing the design location, it is assumed that the construction will be made in a region between the North Anatolian fault line and the East Anatolian fault line, that is, in a region with high earthquake risk. Within the scope of the study, SeismoStruct [1] software was used during the design and performance evaluation of the structures. Nonlinear static push and incremental dynamic analyses were used. Uniform and triangular load distributions were adopted in the PO analysis, and 16 earthquake ground motions were used in the dynamic analysis. The effect of story number on the seismic behavior of CMRFs was investigated using nonlinear analysis results. Accordingly, variation in lateral response, overstrength factors, ductility, and section capacity change of members for CMRF structures were presented. In addition, a mutual evaluation was made with the performance parameters obtained from previous studies with similar geometries.

Ulusal ve Uluslararası Standartlarda Üretilen Kompozit Binaların Karşılaştırmalı Analizi

ÖZ

5-, 10-, 15- ve 20 katlı binalar beton dolgulu çelik tüp kolonlu ve kompozit kirişli moment aktaran çerçeve binalar modellenmiştir. Binalar yüksek süneklik seviyelerinde TCDCSS - 2016 ve TBEC-2018 yönetmeliğine göre tasarlanmıştır. DCH yapılarının tasarımı, 0.79 g PGA için ZC zeminde tasarlanmıştır. Tasarım yeri seçilirken, inşaatın Kuzey Anadolu fay hattı ile Doğu Anadolu fay hattı arasında kalan bir bölgede, yani deprem riskinin yüksek olduğu bir bölgede yapılacağı varsayılmıştır. Çalışma kapsamında yapıların tasarımı ve performans değerlendirmesi yapılırken SeismoStruct [1] yazılımı kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik itme ve artımlı dinamik analizler kullanılmıştır. PO analizinde düzgün ve üçgen yük dağılımları kullanılmıştır. Dinamik analizde 16 deprem yer hareketi kullanılmıştır. Kat sayısının CMRF'lerin sismik davranışı üzerindeki etkisi doğrusal olmayan analiz sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Buna göre, CMRF yapıları için elemanların yanal tepkisindeki değişim, aşırı dayanım faktörleri, süneklik ve kesit kapasitesi değişimi sunulmuştur. Ayrıca benzer geometrilere sahip önceki çalışmalardan elde edilen yapıların performans parametreleri ile karşılıklı bir değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit moment aktaran çerçeve, Beton dolgulu çelik tüp kolon, Artımsal dinamik analiz, Doğrusal olmayan statik itme analiz, Sismik davranış faktörü

1. Introduction

As the design heights of the buildings increase, the need to use columns with high strength capacities increases, especially to absorb earthquake effects [2]. For steel structures, high strength in columns can be achieved by using steel material class with high yield strength and/or profiles selected as larger cross-sections. On the other hand, in a similar situation in reinforced concrete structures, higher capacity columns can be obtained by increasing the class and/or compressive strength of the concrete material used and again by increasing the cross section. It is also possible to benefit from the high yield strength of the steel obtained by forming a single section and the high compressive strength of the concrete. Among the sections that can be produced in this way, the most used and experimentally/theoretically studied concrete-filled steel tube (CFST) sections in the last century are the most used column elements (Figure 1) [3-7].



Figure 1. Some examples of buildings whose construction has been completed are in order from left to right, SEG plaza in Shenzhen, Ruifeng building in Hangzhou and Canton Tower [7]

The strength of columns, which are vertical loading members in both steel and reinforced concrete structures, can be made with designs that can be made without using relatively large cross-sectional areas. In other words, by using composite sections made of steel and concrete (or reinforced concrete), more suitable sections can be obtained, and the required capacity increase can be achieved. However, if only moment resisting frames (MRF) are used for design during the behavior of earthquake loads, it is necessary to limit the relative story drifts and secondary effects. In this case, by using composite columns in the design, the required stiffness and ductility can be achieved more effectively than steel and reinforced concrete systems. Considering the large axial force strength for the columns used in steel frames with central and eccentric braces, the required strength can be easily obtained by forming CFST columns profile [8-10].

Today, the use of composite profiles instead of reinforced concrete or steel profiles in elements with high compressive strength, which can meet the increasing axial pressures and have high ductility during element design, is more advantageous in terms of construction speed and economics, especially in high-rise buildings designs. It is known that the steel profile creates a continuous confinement effect in the concrete, especially when looking at the CFST column elements. On the other hand, it is expected that the strength and ductility of concrete will increase while CFST acts as a core within the element. In addition to all these positive effects, its location in the concrete core prevents local buckling of the steel profile [11,12].

Examining the nonlinear responses of earthquake resistant MRF systems, in which composite section elements are used during design, is important in terms of evaluating the advantages available in such systems. Non-linear analyzes were used in the studies on the design and performance evaluation of multi-story MRF, which consists of composite section column and beam elements, under the influence of earthquakes. In this analysis phase, it has been shown that the evaluation and identification of the member is very important in terms of convergence of the results to reality. Therefore, for an accurate

performance evaluation, column-beam junctions and related deformation conditions must be carefully evaluated and added to the system. In addition, in the study in which the natural vibration properties of a steel-concrete composite frame and its non-linear behavior under the effect of earthquakes were examined by making static and dynamic analyses, it was revealed that modelling techniques are important [13].

When the techniques of sectional elements in composite element modeling are examined, when the finite element method is applied in element-based studies, it can be modeled very closely. However, it is very difficult to define the number of elements formed and the surface interactions established between them. In structural systems, on the other hand, defining element sections as solids one by one is both time-consuming and difficult in terms of modeling technique. On the other hand, the number of elements that will occur in the system prolongs the analysis process considerably. On the other hand, modelling of these elements based on the loading system is important in terms of design, so the time to reach the solution is not effective. Therefore, the fiber cross-section model, which is an alternative to this technique and provides the opportunity to make sensitive analyses as well as being faster, seems to be a more practical method [11,12,14,16].

In the models examined within the scope of this study composite moment resisting frames (CMRF), the structural system consisting of square section (SHS) CFST columns, IPE steel beams and composite beams, which are in full interaction with the slab, were examined. 5-, 10-, 15- and 20-storey structures were designed as CMRF using the principles of the Regulation on Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures 2016 (TCDCCS-2016) [17] and the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBEC-2018) [18] on the seismic design. Static pushover analysis (PO) and incremental dynamic analysis (IDA) were used to obtain information on the earthquake performance of the buildings. The cross-sectional deformations of the loading system elements and the response of the system in terms of various parameters were evaluated. As a result, the performances of the buildings modelled within the scope of TBEC-2018 were examined comparatively with static and dynamic methods for a certain ground property. A flowchart of the method followed is presented in the Figure 2.

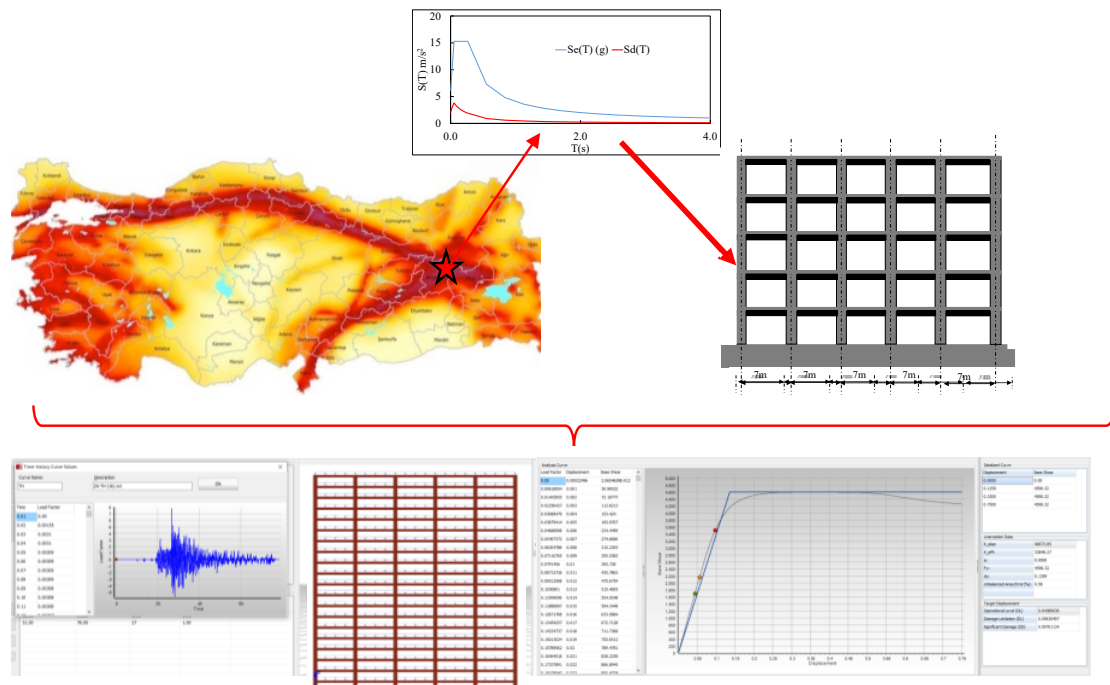


Figure 2. Flowchart of methodology

2. Example Structures

In the building designs, steel tube elements with SHS section and sections obtained by filling the cores with concrete suitable for the design were used in the column elements. These elements are composite columns defined as CFST section in the literature. Vertical and horizontal earthquake loads of beams

are calculated under static and dynamic design loads, and their sections are dimensioned to consist of IPE type steel section elements. In all MRF systems, designs have been made so that moment transfer occurs at the joint points of IPE frame beams and CFST columns and are included in the analysis (Figure 3). During the design, the flooring systems were made massive. It is included in the calculations as a cast-in-situ reinforced concrete slab system that can be accepted at the design stage with the full interaction of the floor slabs on the main beams. The anchorage of the columns in the foundation system is included in the calculations with the assumption of full support in both directions. The storey height of the CMRF structures is 2.65 m and the total height from the ground is 113.25, 26.5, 39.75 and 53 m for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures, respectively. 5 openings in the x and y directions of the buildings modeled in CMRF structures and 7 m spans each are included in the design calculations. Therefore, the total width of the CMRF systems in the x and y directions is constant and is 35m (Figure 4). Seismic parameters are needed to design CMRF systems. For this reason, a location in Bingöl Province Kaloiva District Yeşilyurt Mahallesi (Latitude: 39.298011° Longitude: 41.014378°) was preferred in the design phase to carry out the design processes over a hypothetical location. For this geographical location, ZC, which is the soil conditions used in the systems to be compared with the literature, was chosen conditions. While steel class is S235 in structural system elements, concrete class is determined as C30/37 in the design. The analytical models used during the sizing of the structural elements of the building as CMRF are given in Figure 5. SeismoStruct [1] computer software was used in the design and performance evaluation and development of the analytical model (Figure 5). To take into account possible torsion effects in the direction calculated according to TBEC-2018 clause 4.5.10.2.b, an eccentricity of 5% of the floor length in the direction perpendicular to the earthquake direction is considered.

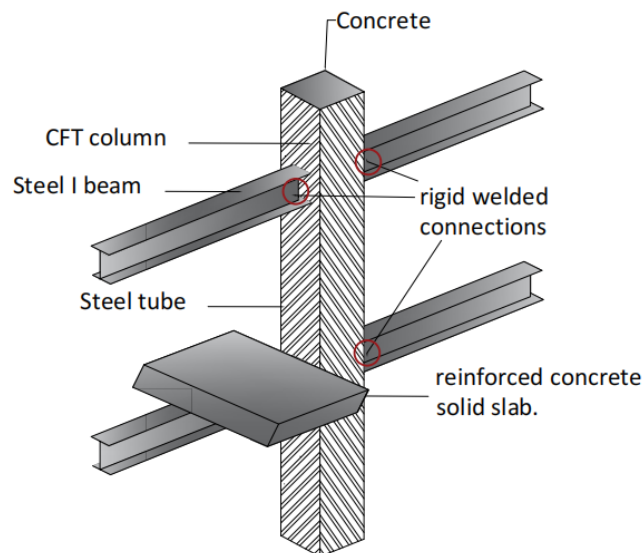


Figure 3. System view for MRF joint configuration.

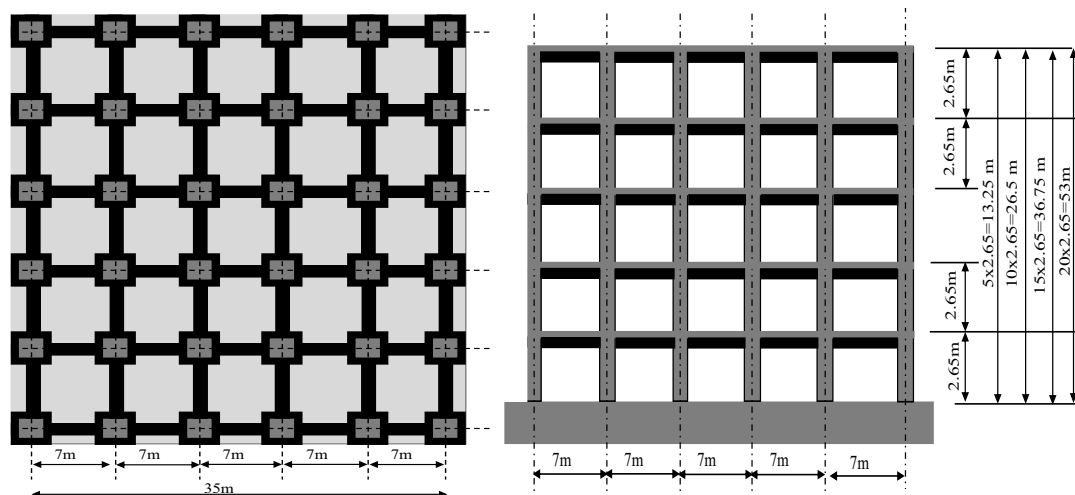


Figure 4. Schematic view of plane and elevation view

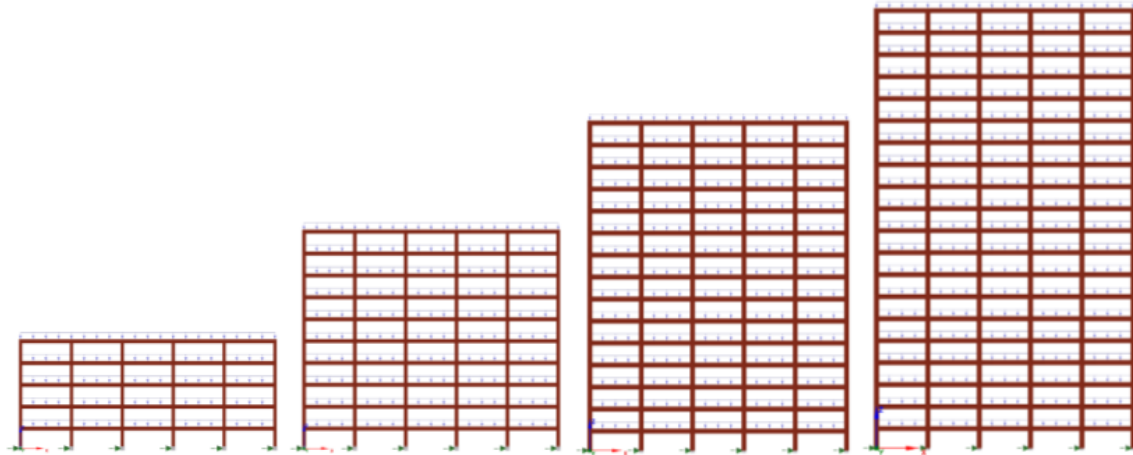


Figure 5. SeismoStruct program view of CMRFs

2.1. Structural design

During the design of the CMRF systems, the dimensioning of the sections and the section capacities were made in accordance with the TCDCSS-2016 and TBEC-2018 Regulations by using the loads acting on the beam and column elements in the system. In the CMRF design analysis, the SeismoStruct [1] computer software was evaluated in accordance with the relevant regulations and used in the analysis. The self-weights of the structural elements are calculated automatically by the program in line with the data entered the computer software and are considered in the analysis. During the seismic design analysis of the buildings, the dead load value was defined as 3 kN/m^2 and was considered in the analyses. The live load was taken as 2.0 kN/m^2 . To determine earthquake loads in seismic designs, it is necessary to obtain graphs of elastic design spectral accelerations. These data are taken from the relevant design regulations. In addition, the natural vibration period of the structure should be calculated. Within the scope of this study, the natural vibration period was calculated using Equation (2.2) given in TBEC-2018, and then the seismic forces were calculated according to the accelerations obtained from the elastic spectrum using the natural vibration period. For this reason, firstly, the calculations of the horizontal elastic design spectrum were made. For this purpose, the relevant spectrum was obtained based on the *DD-2* earthquake ground motion level, which has a 10% probability of exceedance in 50 years, and the local soil class *ZC*. On the other hand, information on spectral acceleration coefficients and ground effect coefficients should be determined in the creation of horizontal elastic design spectrum values. The data of the map spectral acceleration values were determined through the geographical location data selected for the construction sites of the design models and the Turkey Earthquake Hazard Maps [19]. Local ground effect coefficients were obtained based on local ground effect coefficients for local soil class and short period region and local ground effect coefficients for 1.0 second period according to TBEC-2018 Section 2.3.3. The damping ratio was taken as 5%. seismic design analysis. Using the Turkey Earthquake Hazard Maps [19], the short-term map spectral acceleration coefficient was read as $SS= 1.947$, and the map spectral acceleration coefficient for the 1.0 second period was read as $S1= 0.514$. The highest ground acceleration was obtained as $PGA=0.791g$ and the highest ground speed as $PGV=60.469 \text{ cm/s}$. It is of great importance that the structural systems can serve the collapse prevention performance after severe earthquakes caused by continental plate tectonic movements. Compliance with the relevant regulations is of great importance, especially to minimize the material and moral damages that occur in earthquakes such as the 06.02.2023 Kahramanmaraş earthquake that occurred recently. Relevant design criteria are constantly updated in the literature by researchers and commissions in national and international standards. Comparative evaluation of the information contained in current international and national regulations is important in this respect. The designed buildings are evaluated as residential buildings, considering the damages and losses after the earthquakes in question. In addition, the general structural design coefficients used in such structures have been considered from the relevant sections of TBEC 2018.

In the study, the properties of the structural system were designed as composite beams consisting of CFST columns with high ductility and IPE section steel beams during the design phase. In accordance with this situation, according to Section 4.3.2.2 given in TBEC-2018, the behavior coefficient R and the


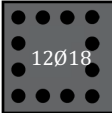
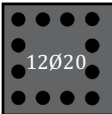
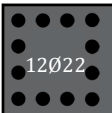
extreme resistance coefficient D will be used. In the selection of the relevant values, R and D column systems and steel structure systems, which are recommended to be used for the composite section, will be used. According to Table 4.1 given in TBEC-2018 for the properties of the structures, the coefficients of $R=8$ and $D=3$ given for buildings with steel frames with high ductility level and where all earthquake effects are carried by MRF systems are taken as basis. for these CMRFs. The General Analysis Method was used to calculate the required strengths of the structural elements, and the Design Method with Load and Strength Coefficients was used for dimensioning. As a requirement of this method, the axial and shear stiffnesses of all the elements of the lateral structural system (composite columns and frame beams in this study) and the bending stiffnesses of the frame beams were multiplied by one. According to TCDCSS-2016 6.2.3 0.8. The reduction coefficient applied to the bending stiffnesses of the composite columns was obtained as $0.8 \times 0.8 = 0.64$ according to TCDCSS-2016 6.2.3(b) and 12.2.5(d). The natural vibration periods, total CMRF weights and base shear forces were calculated from SeismoStruct software. The values were given in Table 1.

Table 1. Design results

Parameter	5-story	10-story	15-story	20-story
Natural vibration periods (s)	0.677	1.440	1.595	2.131
Total CMRF weights (kN)	6484	13475.8	23376.5	32553.7
Base shear forces (kN)	770.7	792.4	1204.4	1237.5

According to the data obtained from the analysis results, no additional analysis was required, since no irregularity occurred in the plan and vertically in the analyzes made under the influence of the earthquake, and the CMRF structures were modeled to have a smooth geometry in plan and elevation. It was seen that the evaluation of the effective relative story drift ratio and secondary order effects coefficients provided the limit values defined in TBEC-2018 article 4.9. In addition, the seismic design features performed with composite beam and column elements with high ductility level and the seismic design analysis results show that the system provides the conditions for designing at high ductility level. Columns were designed in accordance with section 12.3.2 of the Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures (TCDCSS-2016) Regulation. The method used to calculate the column cross section involves using the axial force-bending moment interaction diagram. TCDCSS-2016 Table 12.5, which contains information about the plastic stress distribution method, was used to obtain this diagram. In addition, the limit condition $N_{dm} \leq 0.40P_{no}$ for axial pressure force levels in composite columns specified in TBEC-2018 section 9.11.4.2 meets all CMRF systems. N_{dm} is defined as the maximum pressure force value obtained from the axial pressure forces calculated from the combined effect analysis in which vertical loads and earthquake loads are considered together (taking into account the live load reduction coefficients defined for live loads in TS 498 [20]). P_{no} is defined as the compressive strength of the composite section. During the CMRF seismic design, strong column weak beam design was applied at all beam-column joints and column-beam junctions for the analysis of each earthquake direction. Relevant details are given in TBEC-2018 9.11.2.2.

Table 2. Section and material properties of the structural members

ID	Beam	CFST Column (bxt mm)	Section details	Concrete	Structural Steel	Reinforcement
5-story	IPE 400	450x32		C30/37	S235	S420c
10-story	IPE 400	500x32				
15-story	IPE 500	650x40				
20-story	IPE 500	750x55				

The cross-sectional properties and material properties of composite columns and beams in CMRF structures after seismic analysis are presented in Table 2.

2.2. Nonlinear analytical models of the CMRF system

After the seismic design was completed in accordance with TCDCCS-2016 Regulation [17] and TBEC-2018 [18], the analyzes to obtain the nonlinear behavior of CMRF structures were carried out using SeismoStruct [1] computer software. Firstly, the analytical models were transformed into fiber cross-sectional elements during the design phase. In these elements, considering the material properties used, the new systems have been updated with element models with nonlinear behavior by taking advantage of previous studies. Thanks to the use of these element and material models, the software enables the analysis to be concluded by using the structural and geometric quadratic effects in all analyses. For the non-linear behavior of the composite columns and beams, models based on the bulk plastic behavior approach and represented in the software as predefined are used. In these modeling elements, sections divided into fiber elements were used to obtain the plastic behavior of the composite beams and columns in the model. In these models, the element section is divided along the element into the number of fiber elements specified by the designer in the section according to an algorithm in the software. In this way, it is assumed that the plastic behavior is propagated by the fiber elements in the element section and throughout the element. More importantly, it has been verified by the researchers that the element force-deformation distribution between the fiber parts of the concrete and steel sections forming the composite section is provided with sufficient accuracy by the software [5, 6, 11, 12, 21, 22]. The plastic behavior that occurs or is likely to occur in the entire element during the analysis is directly determined by the SeismoStruct software based on the material properties and model given by the designer in the software. Numerical models defined as ready-made in the software work with different assumptions by theorizing the results obtained from the literature during calculations. Moreover, during the definition of models and the use of analyzes, basic physical properties for these model elements, such as basic input parameters, section geometry, and uniaxial behavior, need to be defined in accordance with the models. CFST column members and composite beams are modeled as fiber cross-sections as shown in Figure 6 by the number of fibers specified in the software. The tiles were not considered directly in the analytical models. However, it is assumed that rigid diaphragms are formed at the floor level in each floor plane by defining the system. The vertical load combinations of dead and live loads calculated from the floors are defined as the system loads on the frame beams.

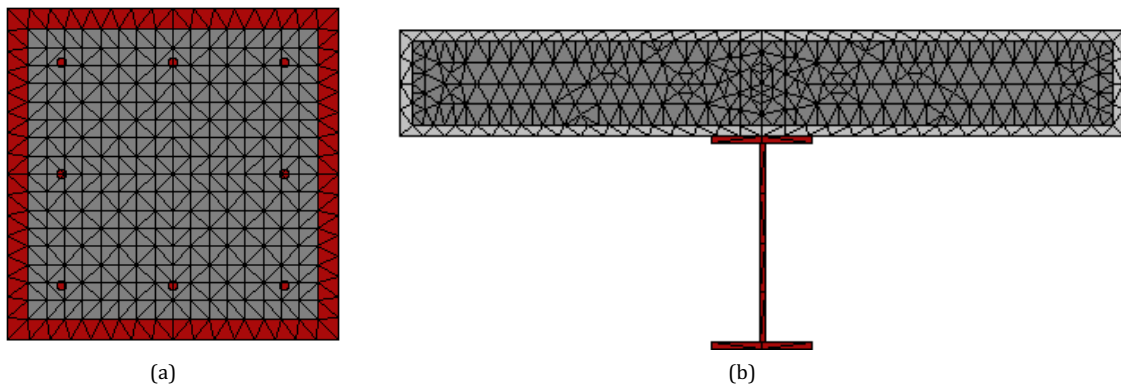
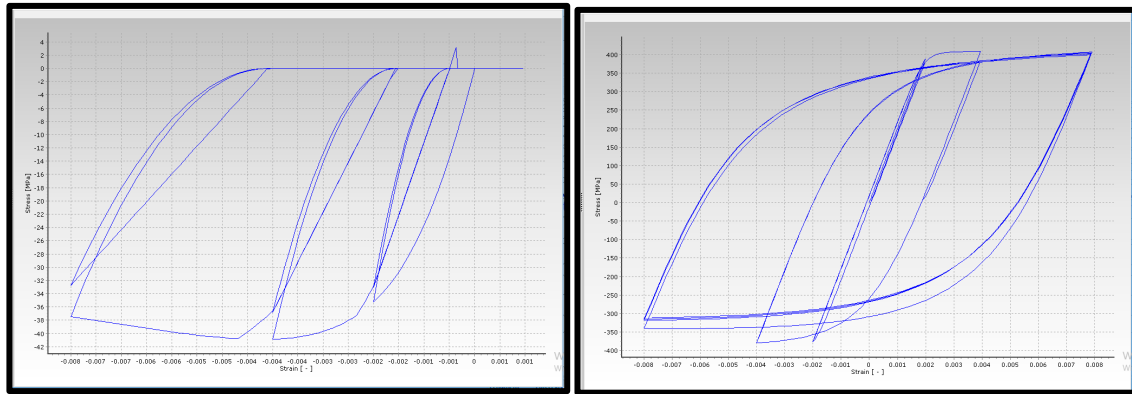


Figure 6. Fiberized section views for (a) CFST columns and (b) composite beam

Expected material strengths were used in nonlinear behavior models of steel and concrete materials used in CMRF elements. To obtain these strengths, the data in TBEC-2018 Table 5.1 were used. Accordingly, the expected material strengths predicted for the characteristic compressive strength of concrete and the characteristic yield strength of the S235 steel class are considered as $1.3f_{ck}$ and $1.5F_y$, respectively. The nonlinear behavior of the steel material is represented based on a hardening of 0.005. Bilinear steel model is used for steel modelling in SeismoStruct [1] software and this is defined as “stl_bl” material model in the software. Tensile strength is neglected in the stress-strain curve of the concrete material. In addition, the “con_ma” model in the software was used for the non-linear behavior of the material while modelling the concrete in the SeismoStruct [1] software. Both models were developed for the cycling loading condition. The concrete material constitutive model image is shown in Figure 7a and steel material constitutive model image of the model is given in Figure 7b.



(a) (b)
Figure 7. a) Concrete and b) steel models from SeismoStruct (2018)

Each of the nonlinear analyzes in the time domain (TH) was carried out using earthquake ground motions acting simultaneously in the horizontal plane perpendicular to each other, under the effect of a constant gravity load. While calculating the gravity load values, it has been calculated as 30% of the live load in addition to the building floor weight, that is, the fixed loads, which are effective in the earthquake. The analyzes consist of two parts. In the first stage, PO analyzes consist of 2 parts as uniformly distributed horizontal loading (ULD-PO) and triangular horizontal loading (TLD-PO). The second phase is the application phase of incremental dynamic analyzes (IDA) and TH earthquake ground motions. Earthquake ground motions consist of 8 ground motion pairs. In the selection of historical earthquake records to be used in the performance analysis using earthquake records, care was taken to select the severe earthquakes that occurred in the region. Studies in the literature show that using 7 to 20 earthquake records is sufficient for evaluation in IDA results [23-25]. When selecting earthquakes, large-scale earthquakes between the Northern Anatolian fault line and the Eastern Anatolian fault line surrounding the city of Karlıova, which is assumed to be built, were used (Figure 8). IDA and PO nonlinear analysis are frequently used by authors in reinforced concrete, steel and mixed structural systems as an important analysis methodology in the evaluation of the performance of structural systems [6, 11,12, 22, 26-31].

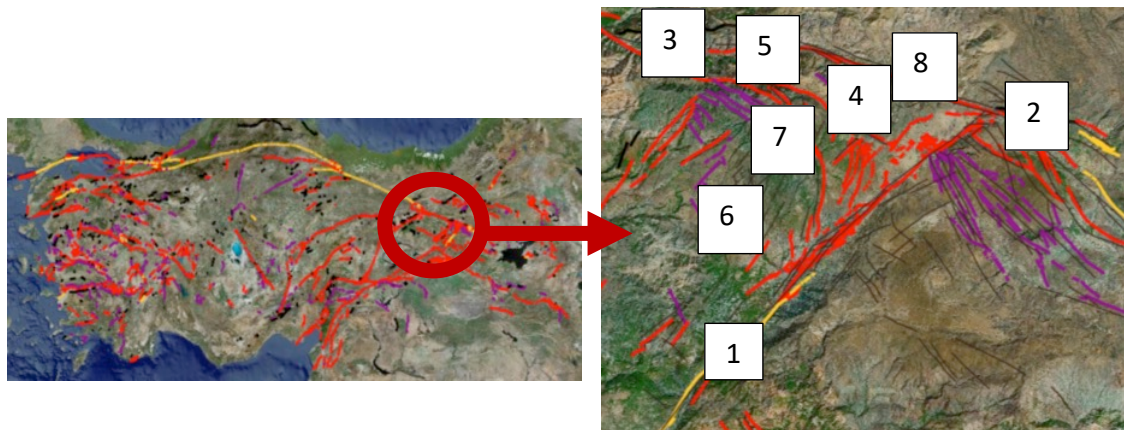


Figure 8. Selected ground motion schematic representation.

The application multipliers of the incremental effects were chosen as 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20, 1.40, 1.50, 1.75, 2.00, 2.30, 2.60, 2.90, 3.20, 3.50, 3.80, and 4.00. It is aimed that the total number of analyzes will be $8 \times 2 = 16$. In this case, the seismic demand values and other calculated parameters were determined by taking the average of 16 IDA analysis results. The characteristics of the earthquake records used in the study are given in Table 3. The information about the earthquake movements in Table 3 was taken from the AFAD ground motion database [32]. Using the existing earthquake records, each selected ground motion pair is scaled with the earthquake spectrum with a return period of 475 years, with a 10% probability of exceedance in 50 years, which is defined as a design earthquake. At the end of the analyzes carried out under these ground motion records; the structures were mutually evaluated according to the design for the targeted performance parameters.

Table 3. Properties of earthquake ground motions.

Record ID	Record Seq. #	Station ID	Event Date	Epicentral Distance (km)	Event Depth (km)	M _L /M _w	Component
TH-1	2183	1133	1.05.2003	11.8	6	6.6/-	East
TH-2							West
TH-3	2896	1206	25.08.2007	2.19	15.8	5.1/-	East
TH-4							West
TH-5	23	2402	13.03.1992	12.82	23	6.1/-	East
TH-6							West
TH-7	10099	1212	14.06.2020	16.2	8	-/5.7	East
TH-8							West
TH-9	24	2402	15.03.1992	45.32	29	5.4/-	East
TH-10							West
TH-11	1828	2306	25.06.2021	30.88	15.51	-/5.2	East
TH-12							West
TH-13	6027	6202	2.12.2015	37	10.66	-/5.3	East
TH-14							West
TH-15	2587	1208	14.03.2005	54.09	9.9	5.4/-	East
TH-16							West

In this study, the panel regions of the joints were modelled with the help of behavioral models originally developed by Della Corte et al. (2000) using the modified Richard-Abbott model. This model included in the SeismoStruct (2018) software includes this model, which can model all kinds of steel and composite connections (eg welded-flange bolted-web connection, extended end plate connection, recessed end plate connection, angled connection, etc.) thanks to its features. The model has increasing and decreasing parts defined by the moment-rotation relationship. The ascending and descending branches of the curve, with the presence of both positive and negative starting points with various parameters to account for load reversals (i.e. initial stiffness, strength, post-limit stiffness, shape factor, compression-related calibration coefficients, damage rate and isotropic hardening). The versatility of this type of modelling has been previously validated using experimental data, and it has been noted that the model shows excellent fit [33-36]. Also, some parameters have been calibrated to achieve greater accuracy in modeling based on the application of the component method [5, 22, 37].

3. Results and Discussion

The response of CMRFs because of ULD-PO and TLD-PO analysis is shown in Fig. 7. In the graphs given, the horizontal axis is the ratio of the roof displacement to the building height, and the vertical axis is the ratio of the base shear to the building weight. In 5-storey CMRFs, IDA analysis presents a behavior that lies between the first-mode dominant response and the higher-mode response. However, on the other hand, the IDA results obtained in 10-, 15- and 20-storey structures are parallel to the ULD-PO results, so it can be said that higher modes dominate in these structures [11, 16, 38]. The IDA was performed by using selected TH records to obtain the seismic response of the case study CMRFs. The dynamic behavior of the structures is also plotted in Figure 9. Figure 9 and other data obtained as a result of the analyzes are also compared with the performances of structures designed with Eurocode, which have been previously examined with similar geometric properties under the relevant headings, and the results are examined.

3.1. Ductility factor

When the studies in the literature are examined, it is used to express the degree of inelastic deformations that occur due to earthquake ground motion under the influence of a structural system or a horizontal load that it may be exposed to while calculating the ductility ratio [11, 12, 16, 39]. That is, the displacement ductility ratio μ (ductility demand) can be expressed as:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

Yield and ultimate displacement values are Δ_y and Δ_u , respectively, in Eqn. (1). The result of IDAs was calculated from Figure 9 and the data were calculated and plotted for the mean μ value. For 5-, 10-, 15- and 20-story CMRF structures, μ factors were calculated from IDA, TLD-PO and ULD-PO and are given in Figure 8. When the μ values obtained due to IDA are examined, it is calculated as 2.23, 1.87, 2.37 and

1.96 for 5-, 10-, 15- and 20-story buildings, respectively. When the μ results are examined, the values obtained as a result of TLD-PO are 10.35%, 6.28% and 14.46% lower for 5-, 10- and 15-storey buildings, respectively, than the values obtained from IDA. However, the μ values obtained because of TLD-PO in the 20-story structure are 6.55% higher than the values obtained from IDA. When the μ values obtained because of ULD-PO were examined, it was seen that they were 17.35%, 4.77% and 9.01% lower, respectively, for 5-, 10- and 15-storey structures compared to those obtained from IDA. The μ values calculated from the IDA and the μ values obtained due to ULD-PO in the 20-story building are 18.06% larger (Figure 10). When the results obtained are compared with the design results of Eurocode-based structures in the literature [11,12] in average 20% greater results are obtained up to the 15-storey building formation. On the other hand, up to 20% smaller values are obtained in 20-storey buildings [11, 12]. In the literature, the general curve obtained from the load-roof displacement and the parameters that can be obtained from this curve are given in Figure 11.

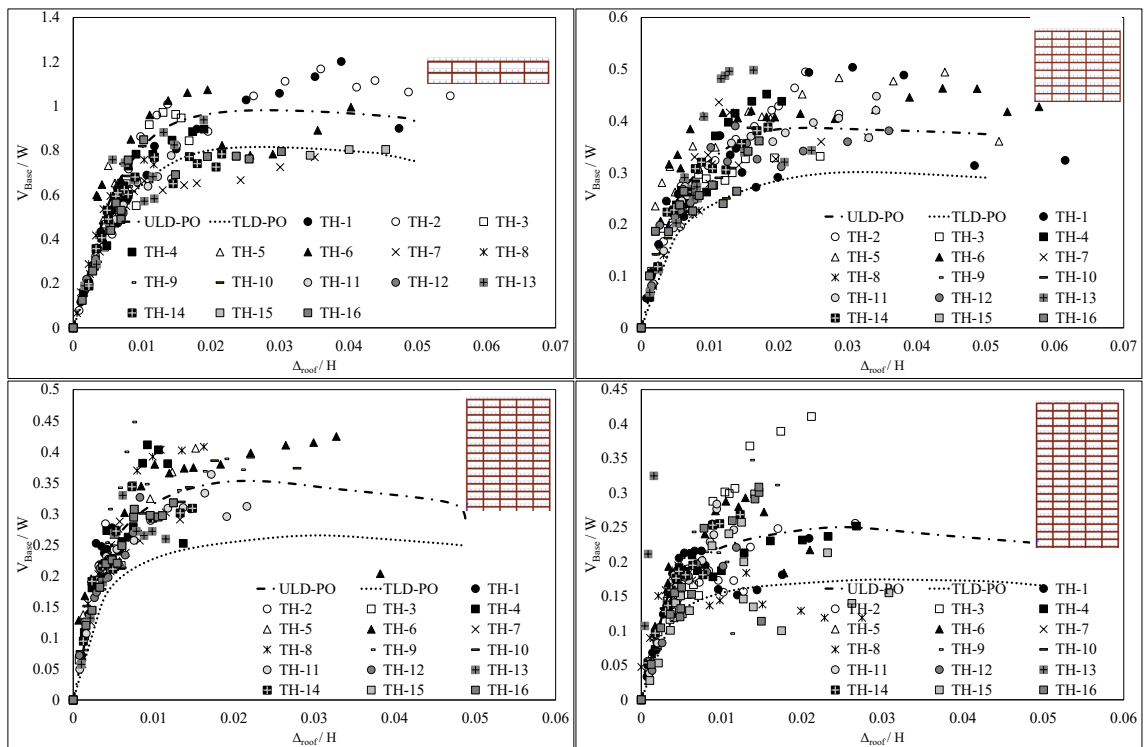


Figure 9. PO and IDA graphs for CMRF structures; 5, 10, 15, and 20 stories

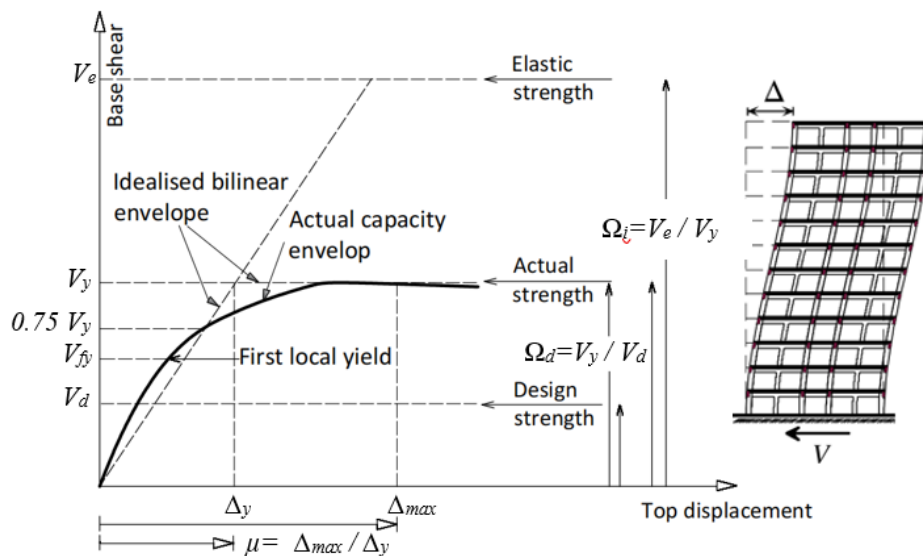


Figure 10. System view for MRF joint configuration

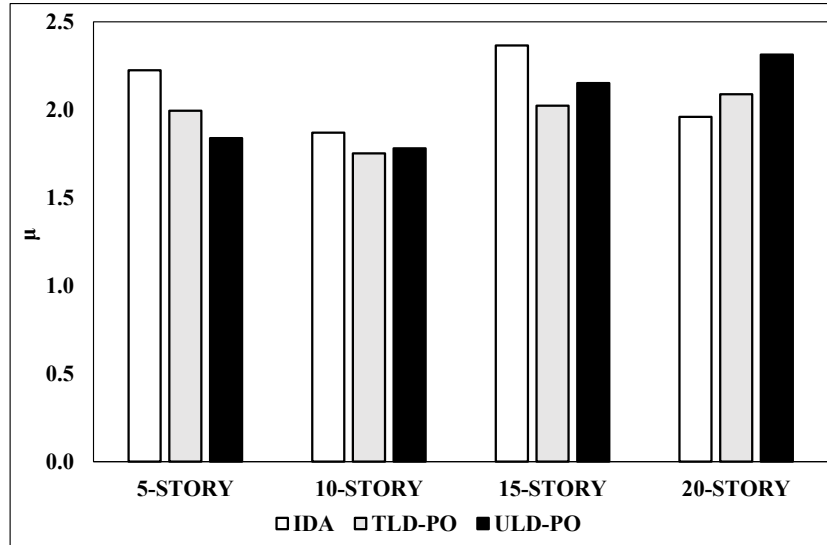


Figure 11. Ductility factor for CMRFs

3.2. Overstrength factor

When describing the nonlinear response of structures, the load-displacement relationship is often assumed to be elasto-plastic. Within the scope of this study, the structural extreme strength factors expressed by the following equation were calculated from the Figure 9 obtained with IDAs for each structure:

$$\Omega_d = \frac{V_y}{V_d} \quad (2)$$

Yield and design base shear values are displayed as V_y and V_d , respectively, in Eqn. (2). As a result of experimental and theoretical studies conducted by researchers for Ω_d , an important performance parameter of the building, it has been shown that this factor plays an important role in protecting buildings from collapse in the face of severe earthquakes [40-42]. It has been reported in the literature that this factor for steel and reinforced concrete structures varies between 1.8 and 6.5 for long-term and short-term structures [40]. The IDA results in this study showed that the Ω_d factors of CMRFs reached 7.22, 6.63, 6.75 and 6.07 in 5-, 10-, 15- and 20-story structures, respectively. The Ω_d factors obtained from TLD-PO analyzes are 3.29% and 1.26% lower for 10- and 15-storey buildings, respectively, than those obtained from IDA. The Ω_d factor for TLD-PO in 5- and 20-story structure is 13.61% and 2.51% larger than the values obtained from IDA. For ULD-PO it is 5.63%, 28.15%, 28.28% and 27.85% lower than the Ω_d factors calculated from IDA for 5-, 10-, 15- and 20-story buildings, respectively (Figure 11).

Although the results obtained with the extreme hardness factor show an increase with the increasing coefficient compared to the results obtained by Etili and Güneysi [11, 12] with the Eurocode-based design, 3-33% larger results are obtained. The biggest difference is seen in buildings with 10- and 20-story [11, 12].

3.3. Inherent overstrength factor

Elnashai and Mwafy [43, 44] recently suggested a measure of response termed 'inherent overstrength factor. Inherent overstrength factor (Ω_i) is formulated as below;

$$\Omega_i = \frac{V_y}{V_e} \quad (3)$$

Yield and elastic base shear values are given as V_y and V_e , respectively, in Eqn. (3). The suggested measure of response Ω_i reflects the reserve strength and the anticipated behavior of the structure under the design earthquake. Clearly, in the case of $\Omega_i \geq 1.0$, the global response will be almost elastic under the design earthquake, reflecting the high overstrength of the structure. If $\Omega_i < 1.0$, the difference between the value of Ω_i and unity is an indication of the ratio of the forces that are imposed on the

structure in the post-elastic range [40]. When the values obtained within the scope of the study were examined, the values of the Ω_i parameter were obtained as 0.93, 0.84, 0.85 and 0.76 from the IDA results for the 5-, 10-, 15- and 20-story CMRF, respectively (Figure 12). These values show that the structures can withstand earthquakes with inelastic deformations. Considering the analyzes with TLD-PO, the calculated Ω_i values were 13.61% and 2.51% higher for the 5- and 20-story CMRF, respectively, than the IDA results. On the other hand, according to the results of the analysis made with TLD-PO, the Ω_i value in the 10- and 15-story building is 3.29% and 1.26% lower, respectively, than the values calculated by the IDA. On the other hand, the ULD-PO results are 5.63%, 28.15%, 28.28% and 27.85% smaller than the IDA results for the 5, 10, 15 and 20-story CMRF, respectively (Figure 12). The natural strength factor results show that, according to the results obtained by Etili and Güneyisi [11, 12] with the Eurocode-based design, the structures designed with TBEC-2018 will absorb earthquake energy by showing a more inflexible behavior against the Eurocode-based design under design earthquakes.

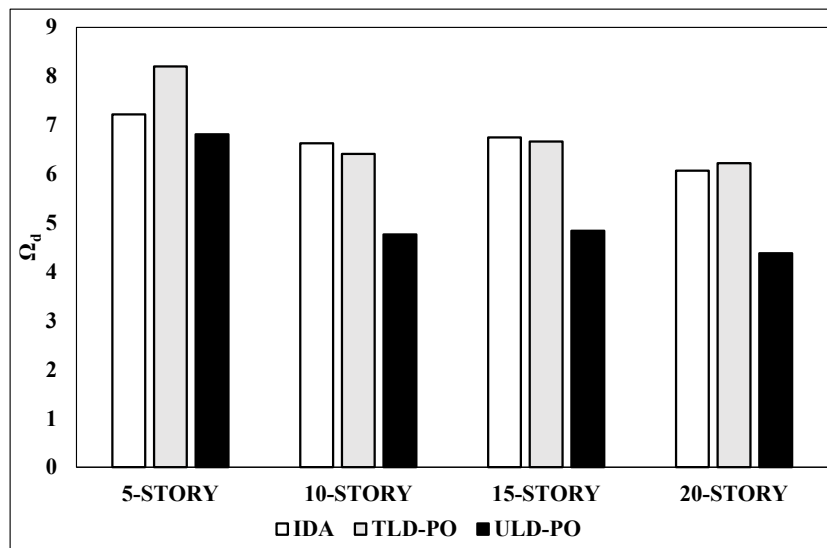


Figure 11. Overstrength factor for CMRFs

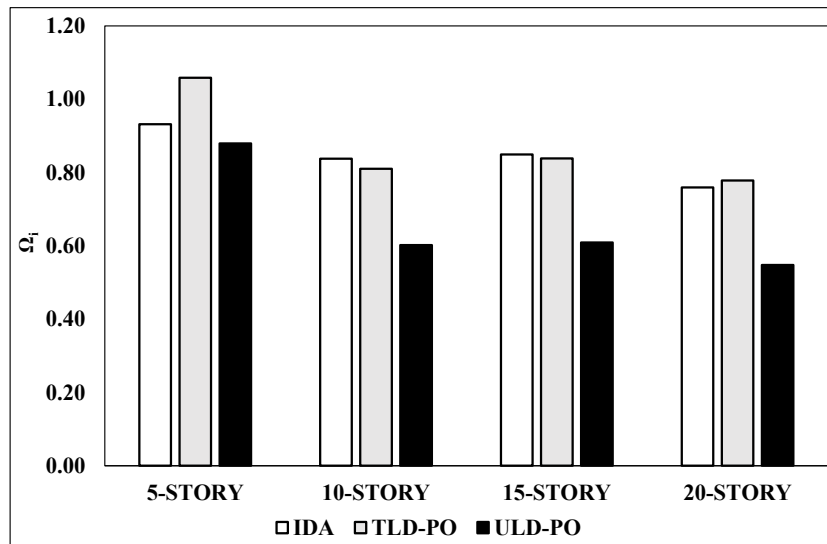


Figure 12. Inherent strength factor for CMRFs

3.4. Composite section capacities

In this part of the paper, the examination of the deformations in the structural elements because of the non-linear dynamic analyzes carried out in the systems formed by the CMRF structures is presented. The deformation states and definitions that occur in the mentioned structural elements are summarized in Table 4. The deformations in the CFST column sections in the CMRF system and in the sections of the composite beams formed by combining the IPE section and the solid slab are examined

within the scope of this section. During the examination, IDR (inter-story drift ratio) values were considered. Section deformations obtained during IDA, TLD-PO and ULD-PO given in Table 4 were evaluated.

Table 4. Deformation states and definitions

Deformation	Definition
BSY	In the composite beam, the steel has reached yield elongation at the outermost fiber.
CSY	In the composite column, the steel has reached yield elongation at the outermost fiber.
BSU	Steel reached its ultimate capacity in the composite beam.
CSU	Steel reached its ultimate capacity in the composite column.
BCU	Concrete reached its ultimate capacity in the composite beam.
CCU	Concrete reached its ultimate capacity in the composite column.
BCF	In the composite beam, the concrete converged to the elongation at crushing limit.

When the results of IDA, TLD-PO and ULD-PO analyzes are examined, the deformation limits of CSY, CSU and CCU in CFST elements in CMRF systems are examined, and the limit states of BSY, BSU, BCU and BCF deformations in composite beams are examined. In the IDA analysis, when the IDR value reaches 0.0072, 0.006, 0.0048 and 0.0049 in 5-, 10-, 15- and 20-story structures, respectively, the BSY deformation in composite beams is in the limit values. On the other hand, the IDR value at which BSY deformations occur in ULD-PO analyzes is 16%, 7%, 9% and 12% smaller, respectively, than the values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-story structures. In addition, IDR values at which BSY deformations occur in TLD-PO analyzes are 17%, 3%, 5% and 11% smaller, respectively, than the values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. The IDR values at which BSU deformation occurred were calculated as 0.0269, 0.0324, 0.0252 and 0.0234 for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures, respectively, from the IDA results. Therefore, the results obtained show that similar deformations are observed for TLD-PO and ULD-PO at smaller IDR values for BSY than the IDR values obtained with IDA. In ULD-PO analyzes, the IDR value at which BSU deformations occurred was 35%, 7%, 9% and 16% greater than the values calculated by IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures, respectively. In TLD-PO analysis, the IDR value at which BSU deformations occur in 5-, 10-, 15- and 20-story structures was 28%, 8%, 11% and 16% larger than the values calculated by IDA, respectively. Therefore, the results obtained show that similar deformations are observed with TLD-PO and ULD-PO at larger IDR values for BSU than the IDR values obtained with IDA. When the BCU deformation occurring in the reinforced concrete parts of the composite beams was examined, it was observed that the IDR value reached 0.0169, 0.0177, 0.0121 and 0.0107, respectively, in the 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. On the other hand, the IDR value at which this deformation occurs in ULD-PO analyzes is 12%, 9% and 2% less, respectively, than the values calculated with IDA for 5-, 10-, and 15-storey structures. However, in a 20-story structure, it is 9% larger. In TLD-PO analyzes, the IDR value at which this deformation occurs is 5% and 6% smaller, respectively, than the values calculated by IDA for 5- and 10-storey structures. Also, while almost the same IDR value is calculated for a 15-storey building, it is 11% greater than the IDR calculated with IDA for 20-storey buildings. In the IDA analyzes, the final deformation BCF of the reinforced concrete part of the composite beams was observed when the IDR value reached 0.278, 0.0294, 0.021 and 0.0191 in 5-, 10-, 15- and 20-story structures, respectively. On the other hand, the IDR value at which this deformation occurs in ULD-PO analyzes is 19%, 16%, 13% and 5% smaller, respectively, than the IDR values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. In addition, in TLD-PO analyzes, the IDR value at which this deformation occurs is 11%, 13%, 10% and 4% less, respectively, than the values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. Therefore, the results obtained show that similar deformations are observed with TLD-PO and ULD-PO at smaller IDR values for BCF than the IDR values obtained with IDA (Figure 13).

Deformations occurring in CFSTs were observed as CSY, CSU and CCU. CSY deformation in CFST is at the limit values when IDR value reaches 0.0117, 0.0157, 0.0171 and 0.0232 values for 5-, 10-, 15- and 20-story structures, respectively, in IDA analyzes. On the other hand, the IDR value at which CSY deformations occur in ULD-PO analyzes is 5%, 13%, 15% and 20% higher, respectively, than the IDR values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. In addition, the IDR value at which CSY deformations occur in TLD-PO analyzes is 22%, 50%, 66% and 83% higher, respectively, than the IDR values calculated with IDA for 5-, 10-, 15- and 20-storey structures. Therefore, the results obtained show that similar deformations are observed for TLD-PO and ULD-PO at smaller IDR values for CSY than the IDR values obtained with IDA. The IDR values at which CSU deformation occurred were calculated as 0.0466, 0.0556 and 0.0545 for 5-, 10- and 15-storey structures, respectively, from the IDA results. On the other hand, there is no IDR value in which the values of this deformation are seen in the 20-story CMRF. In ULD-PO analyzes, the IDR value at which CSU deformations occur is 18%, 14% and

6% smaller, respectively, than the values calculated with IDA for 5-, 10- and 15-storey structures. The structures in which CSU deformations occur in TLD-PO analyzes are only 5- and 15-storey structures. For this analysis method, the IDR value is 5% smaller than the values calculated with IDA for 5-storey buildings, while it is 25% higher for 15-storey buildings. The IDR values at which CCU deformation occurred were calculated as 0.0307, 0.0357 and 0.0355 for 5-, 10-, and 15-storey structures, respectively, from the IDA results. In 20-story CMRF, this deformation was not observed in the IDR values calculated as a result of TLD-PO. The IDR value at which CSU deformations occur in ULD-PO analyzes is 11% and 5% smaller than the values calculated with IDA for 5- and 10-storey structures, respectively. In addition, in the ULD-PO analysis, CSU deformations occurred at a 3% higher IDR value than the IDR values obtained in the 15-storey structure. In addition, the CCU deformation of the 20-story structure was observed only in the analyzes with ULP-PO and the IDR value was calculated as 0.058. In TLD-PO analysis, CCU deformations in 5, 10, and 15-storey structures were 6%, 25%, and 44% greater than the values calculated by IDA (Figure 13). On the other hand, in a project-based study conducted by Güneyisi [15], it is seen that the deformations obtained as a result of IDA in the structures obtained with the Eurocode have more limited deformations than the structures produced with TBEC-2018. In both studies, inelastic deformation occurs rarely in columns in 5-story structures, but inelastic deformation occurs more frequently in 5-, 10-, 15- and 20-storey beams.

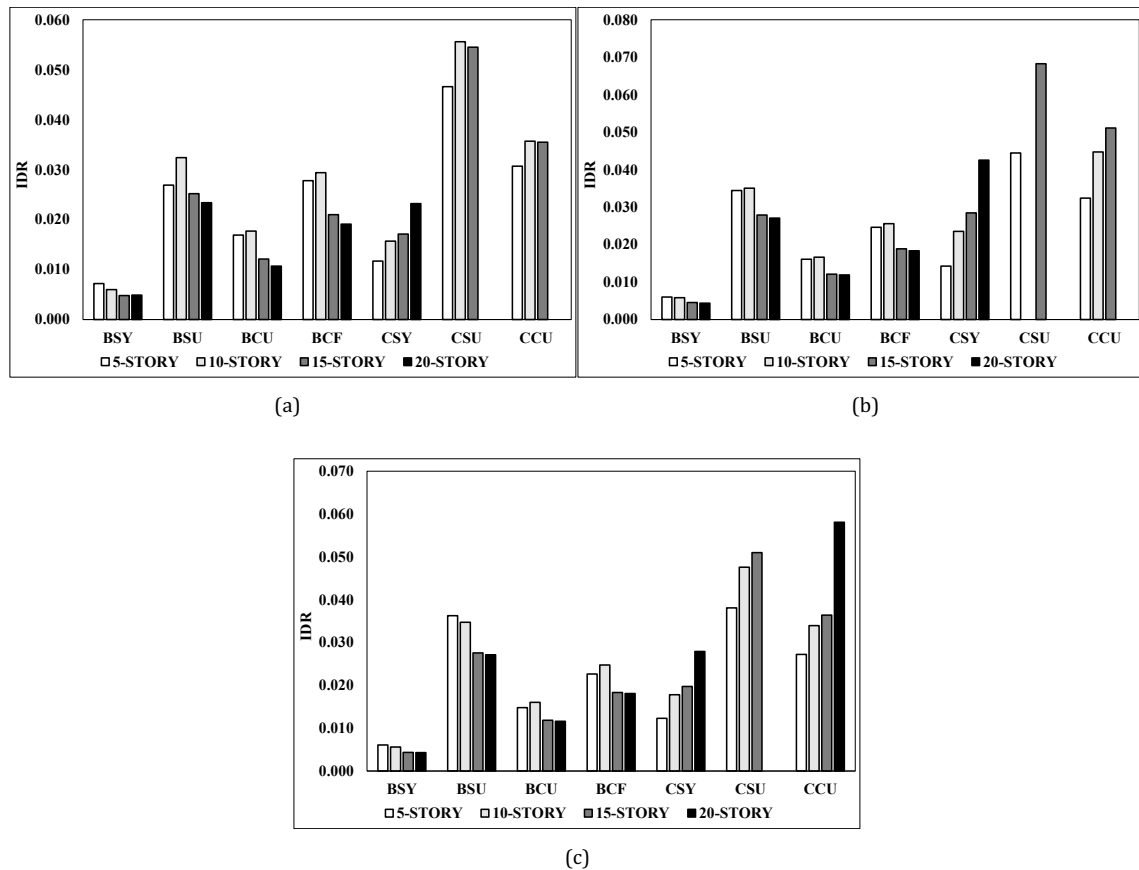


Figure 13. Section deformation variation with IDR for a) IDA, b) TLD-PO, and c) ULD-PO

4. Conclusions

In this study, the structures designed according to TDCSS-2016 and TBEC-2018 design codes were evaluated using deformations in the sections of the elements and various performance parameters, assuming that they were built on soils containing moderately frequent sand and modified stones (*ZC* group soil). For this, static pushover analysis and incremental dynamic analysis were performed. PO analysis with two different lateral load models. When the data obtained are examined, the following conclusions can be reached:

- When the μ values are examined, the obtained values are greater than 1.7. This shows that CMRF structures can adequately absorb earthquake effects thanks to horizontal displacements in a ductile manner. These values are also supported by other studies in the literature [11,12,16].

- In addition, when the μ values obtained as a result of the IDA are examined, it is seen that the IDA results in medium and high-rise buildings are on average 5% higher than TLD-PO and ULD-PO.
- The Ω_d parameter calculated by using IDA analyzes using selected regional earthquakes for the buildings designed as TDCSS-2016 and TBEC-2018 and for the buildings designed as CMRF was obtained as 6.07 at least. In addition, the lowest score in PO analyzes is 4.38. However, considering that the behavior factor is obtained when the μ values are multiplied by the Ω_d parameter, the lowest values to be obtained for the IDA and PO analyzes are 11.89 and 8.48. As a result, they have higher performance factors than calculations with $R=8$ design factor.
- When the Ω_i values are examined, it is seen that almost all the values obtained are less than 1. In this case, structures indicate that they will absorb earthquake energy thanks to their inflexible behavior. However, this is a possible situation in earthquake situations larger than the design earthquake. Moreover, the results obtained from the μ and Ω_d parameters support that the structure is an economical design model.
- When the composite beams are examined according to the IDR change, it is seen that the behavior is within the elastic limits when the IDR value is 0.005. When the IDR value is above 0.02, the plastic behavior dominates in the composite beams. However, this situation emerges as a decreasing IDR value as the number of floors increases. In addition, plastic behaviors observed in concrete occur when the IDR value approaches 0.015 in beam sections.
- In addition, when CFST columns are examined according to IDR change, it can be said that when the IDR value is 0.01, the behavior is within elastic limits and then plastic deformations occur. Plastic behavior is common in CFST columns when the IDR value is above 0.03. However, this situation emerges as an increasing IDR value as the number of stories increases.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] SeismoSoft, "SeismoStruct: A computer software for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures," SeismoSoft.com, 2018. [Online]. Available: www.seimosoft.com. [Accessed: Jan. 12, 2023].
- [2] A. Y. Elghazouli, "Assessment of European seismic design procedures for steel framed structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 8, pp. 65-89, 2009. doi:10.1007/s10518-009-9125-6
- [3] N. E. Shanmugam and B. Lakshmi, "State of the art report on steel-concrete composite columns," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 1041-1080, 2001. doi:10.1016/S0143-974X(01)00021-9
- [4] M. Shams and M. A. Saadeghvaziri, "State of the art of concrete-filled steel tubular columns," *ACI Structural Journal*, vol. 94, pp. 558-571, 1997. doi:10.14359/505
- [5] S. Etili, "Analytical Evaluation of Behavior of Composite Columns Under Axial Load," *International Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 526-536. 2021. doi:10.29132/ijpas.991166
- [6] S. Etili, "Parametric Analysis of the Performance of Steel-Concrete Composite Structures Designed with TBDY 2018," *International Journal of Innovative Engineering Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 7-16, 2022. doi:10.46460/ijiea.1029942
- [7] L. H. Han, W. Li and R. Bjorhovde, "Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 100, pp. 211-228. 2014. doi:10.1016/j.jcsr.2014.04.016
- [8] M. D. Denavit, J. F. Hajjar, T. Perea and R. T. Leon, "Stability Analysis and Design of Composite Structures," *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol.142, pp. 1-12, 2016. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001434
- [9] M. D. Denavit, J. F. Hajjar, T. Perea and R. T. Leon, "Seismic performance factors for moment frames with steel-concrete composite columns and steel beams," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, pp. 1685-1703, 2016. doi:10.1002/eqe.2737
- [10] M. D. Denavit and J. F. Hajjar, "Nonlinear seismic analysis of circular concrete-filled steel tube members and frames," *Journal of Structural Engineering*, vol.138, pp. 1089-1098, 2012. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000544

- [11] S. Etili and E. M. Güneyisi, "Seismic performance evaluation of regular and irregular composite moment resisting frames," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 17, pp. 1-22, 2020. doi:10.1590/1679-78255969
- [12] S. Etili and E. M. Güneyisi, "Assessment of Seismic Behavior Factor of Code-Designed Steel-Concrete Composite Buildings," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, pp. 4271-4292, 2021. doi:10.1007/s13369-020-04913-9
- [13] A. Zona, M. Barbato and J.P.Conte, "Nonlinear Seismic Response Analysis of Steel-Concrete Composite Frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, pp. 986-997, 2008. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445
- [14] C. Vatansever and Y.E. Şimşek, "Design and nonlinear time history analysis of a multi-story building with concrete filled composite columns and steel beams," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences – PAJES*, vol. 27, no. 3, pp. 264–273, 2021. doi:10.5505/pajes.2020.91043
- [15] E. M. Güneyisi and S. Etili, "Investigation of the Effect of Diagonal Eccentricity on Behavior of Braced Composite Structures Under the Impact of Near and Far-field Earthquakes," TUBİTAK. PROJECT NO, 2021.
- [16] S. Etili, and E. M. Güneyisi, "Response of steel buildings under near and far field earthquakes," *Journal of Civil Engineering Beyond Limits*, vol. 1, pp. 24–30, 2020. doi:10.36937/cebel.2020.002.004
- [17] Environment And Urban Ministry of Turkey, "Regulation on Design, Calculation and Construction Principles of Steel Structures," Turkey, 2016.
- [18] TBEC-2018, "Turkey Disaster and Emergency Management Presidency: Turkey Building Earthquake Regulation," Turkey, 2018.
- [19] Turkey Disaster and Emergency Management Presidency, "Turkey Earthquake Hazard Maps," Available: <https://tdth.afad.gov.tr/>.
- [20] TS-498, "Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri," Türk Stand. Enstitüsü, 2007.
- [21] S. Etili and E. M. Güneyisi, "Effect of Using Eccentric Braces with Different Link Lengths on the Seismic Demand of CFST Column-Composite Beam Frames Subjected to Near-Field and Far-Field Earthquakes," *Iranian Journal of Science and Technology*, 2022. doi:10.1007/s40996-022-00994-8
- [22] S. Etili and E. M. Güneyisi, "Effect of nonlinear modeling approaches used for composite elements on seismic behavior of composite framed buildings," *Sâdhânâ*, vol. 47, 2022. doi:10.1007/s12046-022-01871-w
- [23] A. Y. Elghazouli, J. M. Castro and B. A. Izzuddin, "Seismic performance of composite moment-resisting frames," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 7, pp. 1802-1819, 2008. doi:10.1016/j.engstruct.2007.12.004
- [24] D. Vamvatsikos, *Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis*, Stanford University, 2002.
- [25] M. Ferraioli, A. Lavino and A. Mandara, "Behaviour factor of code-designed steel moment-resisting frames," *International journal of steel structures*. Vol. 14, pp. 243-254, 2014.
- [26] N. Fanaie and R. Sheykhi, "Seismic Behaviour Assessment of Eccentrically Split-X Braced Frames," *Scientia Iranica*, vol. 28, pp. 65-84, 2019. doi:10.24200/sci.2019.50655.1804
- [27] A. Seyedkazemi and F. Rofooei, "Comparison of Static Pushover Analysis and IDA-Based Probabilistic Methods in Assessing the Seismic Performance Factors of Diagrid Structures," *Scientia Iranica*, vol. 28, pp. 124-137, 2019. doi:10.24200/sci.2019.51555.2250
- [28] M. Zanjanchi and M. Mofid, "On the assessment of MIDA method for mid-rise steel structures with non-symmetrical plan" *Sci. Iran.*, vol. 26, pp. 2703-2711, 2019. doi:10.24200/sci.2019.21356
- [29] A. Bakhshi and H. Soltanieh, "Development of fragility curves for existing residential steel buildings with concentrically braced frames," *Scientia Iranica*, vol. 26, pp. 2212-2228, 2019. doi:10.24200/sci.2019.21498
- [30] M. Sabouniaghdam, E. Mohammadi Dehcheshmeh, P. Safari and V.Broujerdian, "Probabilistic collapse assessment of steel frame structures considering the effects of soil-structure interaction and height," *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 6, pp. 2979-2994, 2022. doi:10.24200/sci.2022.58707.5860
- [31] M. Maddahi, M. Gerami and H. Naderpour, "Effect of structural uncertainties on seismic performance of moment frame rehabilitated with steel shear wall," *Scientia Iranica*, vol. 28, no. 4, pp. 2010-2022, 2020. doi:10.24200/sci.2020.54252.3668
- [32] TADAS, "Turkey Acceleration Database and Analysis System (TADAS)," [mdsoft.com.tr](http://www.mdsoft.com.tr), [Online]. Available: http://www.mdsoft.com.tr/Pages/Product_EqAcc. [Accessed: Jul. 12, 2023].
- [33] G. Della Corte, G. De Matteis and R. Landolfo, "Influence of connection modelling on seismic response of moment resisting steel frames," *Moment resistant connections of steel frames in seismic areas - Design and reliability*, E&FN SPON London, pp. 485-

512, 2000. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

[34] R. Simoes, L. S. da Silva, P. J. S. Cruz, "Cyclic behaviour of end-plate beam-to-column composite joints," *Steel and Composite Structures*, vol. 1, pp. 355-376, 2001. doi:10.12989/scs.2001.1.3.355

[35] M. F. B. Shamsudin, "Analytical Tool for Modeling the Cyclic Behaviour of Extended End-Plate," Master Thesis, University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2014.

[36] P. Nogueiro, L.S. Da Silva, R. Bento and R. Simões, "Calibration of model parameters for the cyclic response of end-plate beam-to-column steel-concrete composite joints," *Steel and Composite Structures*, vol. 9, pp. 39-58, 2009. doi:10.12989/scs.2009.9.1.039

[37] J. P. Jaspart and K. Weynand, *Design of Joints in Steel and Composite Structures*, ECCS and Ernst & Sohn, 2016.

[38] D. Vamvatsikos and C. A. Cornell, "Direct estimation of the seismic demand and capacity of MDOF systems through Incremental Dynamic Analysis of an SDOF approximation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, pp. 589-599, 2005. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445

[39] E. Miranda and V. V. Bertero, "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design," *Earthquake Spectra*, vol. 10, pp. 357-379, 1994. doi:10.1193/1.1585778

[40] A. S. Elnashai and L. Di Sarno, *Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2015.

[41] A. Whittaker, G. Hart and C. Rojahn, "Seismic response modification factors" *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, pp. 438-444, 1999.

[42] A. S. Elnashai and A. M. Mwafy, "Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings," *The Structural Design of Tall Buildings*, vol. 11, no. 5, pp. 329-351, 2002.

[43] A. M. Mwafy and A. S. Elnashai, "Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings," *Engineering Structures*, vol. 23, no. 5, pp. 407-424, 2001. doi:10.1016/S0141-0296(00)00068-7

[44] A. M. Mwafy, "Seismic performance of code-designed RC buildings," PhD Thesis, Technology and Medicine University of London, London, 2001.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Detection of Personality Features From Handwriting By Machine Learning Methods

Hilal Müsevitoğlu^{a,*}, Ali Öztürk^{b,ç}, Fatiha Nur Başunal^d

Submitted: 25.01.2023 Revised: 23.05.2023 Accepted: 16.06.2023 doi:10.30855/gmbd.0705064

ABSTRACT

Keywords: Handwriting analysis, Machine learning, Graphology

^{a,*} HAVELSAN,
06510 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5791-790X
e mail: hmusevitoglu@havelsan.com.tr

^b HAVELSAN,
06510 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1797-2039

^c KTO Karatay University,
Computer Engineering Department,
42020 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1797-2039

^d HAVELSAN,
06510 - ANKARA, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0896-1194

*Corresponding author:
hmusevitoglu@havelsan.com.tr

Handwriting contains a lot of information about the person writing it and is a sign of personality traits represented by neurological patterns in the brain. In other words, our brain and subconscious actually shape our character as a result of our habits. It is possible to get an idea about the mood of the individual by examining the handwriting. Joy, sadness, anger and anxiety are some of them. In this study, handwritings of people belonging to different professions and age groups were collected. Feature extraction methods was applied on these articles by applying word and line detection, slant, pressure, page layout and similar image processing methods. The obtained features formed the inputs of the dataset. Personality traits such as calm, optimistic, emotional, extrovert, which were estimated using graphology, were added to the dataset as outputs. Then, this dataset was applied to Random Forest (RF), Naive Bayes (NB), Decision Tree, Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) algorithms. According to the performance metrics used, the Random Forest algorithm gave the most successful results in terms of accuracy, precision and f1-score metrics. For this algorithm, the accuracy, precision, recall and f1 score values were found to be 0.90, 0.91, 0.84 and 0.85, respectively. Furthermore, the results of the personality analysis were compared with the results of the personality test performed by the expert psychologist. As a result of this comparison, it was seen that there was a 73% match.

Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile El Yazısından Kişilik Özelliklerinin Tespiti

ÖZ

El yazısı, yazan kişi hakkında birçok bilgiyi barındırır ve beyindeki nörolojik desenler tarafından temsil edilen kişilik özelliklerinin işaretidir. Diğer bir deyişle beynimiz ve bilinçaltımız aslında alışkanlıklarımızın bir sonucu olarak karakterimizi biçimlendirmektedir. El yazısı incelenerek bireyin içinde bulunduğu ruh hali hakkında bir fikre varmak mümkündür. Sevinç, hüzün, öfke ve kaygı bunlardan bazılarıdır. Bu çalışmada farklı meslek ve yaş gruplarına ait kişilerin el yazıları toplanmıştır. Bu yazılar üzerinde kelime ve satır tesbiti, eğim, baskı, sayfa boşluklarının bulunması ve benzeri görüntü işleme yöntemleri uygulanarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Elde edilen özellikler veri setinin giriş sütunlarını oluşturmuştur. Grafoloji kullanılarak tahmin edilen sakin, iyimser, duygusal, dışa dönük gibi kişilik özellikleri ise veri setine çıkış sütunları olarak eklenmiştir. Daha sonra bu veri seti Rastgele Orman, Naive Bayes, Karar Ağacı, Destek Vektör Makinaları, Lojistik Regresyon, XGBoost ve LightGBM algoritmalarına uygulanmıştır. Doğruluk, kesinlik ve f1-score performans metriklerine göre en başarılı sonucu Rasgele Orman algoritması vermiştir. Bu algoritma için doğruluk, kesinlik, hatırlama ve f1 skor değerleri sırası ile 0.90, 0.91, 0.84 and 0.85 olarak bulunmuştur. Ayrıca kişilik analizi sonuçları, uzman psikolog tarafından yapılan kişilik testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda %73 oranında eşleşme olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: El yazısı analizi, Makine öğrenmesi, Grafoloji

1. Introduction

Writing, which is a part of our lives, not only expresses what is written on paper, but also contains clues about our feelings. In this period when technology is advancing rapidly, handwriting still maintains its importance and existence, although it seems that handwriting has been replaced by the internet, media and e-mail in an undeniable extent. Everyone uses handwriting as well as technology in social or business life. Traces, patterns, shapes, symbols left from the moment the tip of the pen touches the paper have the ability to reflect a person's identity in a unique way, just like a fingerprint or DNA. About a hundred years ago, German Professor W. Preyer said that writing was created by the brain, not by training certain muscles [1]. Subsequent studies have also revealed that the most influential organ in the article is the brain. From this point of view, it is seen that handwriting is an effective tool for directly accessing the human brain and therefore psychology. Therefore, character analysis from handwriting has the potential to be applied in many different fields. Looking at the literature; forensic investigations, human resources (recruitment process), psychological counseling and guidance services, training etc. are used in the fields. Studies in which handwriting and personality analysis are associated are generally examined under the science of Graphology. Graphology is a field of study that covers inferences about a person's personality and character, based on a person's handwriting [2]. In order to make inferences in graphology, methods such as writing inclination, pen pressure, characteristic of certain letters, spaces between lines and words, inclination and size of letters are used.

There are different studies in the literature using machine learning algorithms for personality analysis. In the study carried out by Champa and Kumar; MATLAB was used to process features such as slope, pen pressure, characteristic of letters 'y' and 't' [3]. In another study on determining personality traits from handwriting using convolutional neural networks (CNN); it has been proposed to determine the personality, structure and symbol trait analysis of an individual from the handwritten image. CNN, which is based on symbol analysis, was used as a classification method. The margin, the spaces between the lines, the spaces between the words, the printing and the oblique or inclination and certain letter feature which were not done in previous researches were examined [4]. Santana et. al. estimated identity analysis from handwriting using 5 different graphological parameters as input on a dataset with 29 participants, namely "vertical position", "combination of letters", "pressure force", "thinning area" and "letter a". They used Artificial neural networks (ANN) and Support Vector Machine algorithms. As a result of the study, 99.34% success was achieved from the dataset consisting of 29 authors. Later, when the dataset was expanded to 70, the success rate decreased to 92% [5]. In a different study [6], the identity of the author was extracted from the writing style. A new feature based on Graphology or Forensic techniques, which is digitized and classified by a decision fusion block by neural networks, is presented. Offline analysis was done using handwritten images. A success rate of 94.6% was obtained on the dataset consisting of 100 samples. Another study discussed the latest developments in computer graphology systems. In addition to the features such as page margin, baseline, line and word spacing, line direction, inclination of words and letters, size of letters, pen pressure, writing speed, the letter 't', letter 'i', letter 'f' and the letter 'y' can also be effective in writing analysis. It has been mentioned that different rule-based analysis methods such SVM and artificial neural networks (ANN) are frequently used in graphology [7]. Anand et. al. used graphology, aptitude testing and personality testing to help people get acquainted with various career fields and choose the appropriate profession. The study considered the fundamental aspects of human behavior and analysis. Analyzes used were Aptitude Test, Psychometric Test (Myers-Briggs Type Indicator) and handwriting. From the handwriting samples taken, features such as spacing between words, left margin, right margin, font pressure, letter inclination, letter size, and the size of the letter "I" were calculated. The integration of all three modules offers individuals suitable career options [8]. In another study based on machine learning approach for handwriting personality analysis and author identification, a baseline, spacing between words, left margin, letter pitch, bar height in letter "t" attributes were used to predict an individual's personality. The polygonization method was used to extract features from the base. For this purpose, pattern matching was used for the letter "t" and one line was used for other features (projection profiles of the text). With the help of these features, the identity of the author was determined by the developed tool. The IAM database and Python programming language were used to develop the tool [9].

The handwriting features used in our study are; the right, left, top and bottom margins of the page, lines and spaces between words, pen pressure and slant of the text. These were chosen, because they reflect the personality analysis characteristics which are most commonly used in graphology. The machine

learning algorithms used are; NB Classifier, Decision Trees, RF, SVM, Logistic Regression, XGBoost and LightGBM. Python language and OpenCV Library are used for the implementation of algorithms and feature extraction, respectively.

2. Materials and Methods

This section introduces the dataset used in the study, the personality test applied to the people from whom the handwritings were taken and the machine learning algorithms.

2.1. Dataset

The dataset used in this study was created by collecting handwriting samples from people of different ages and working groups. A ready-made text was given to the people and they were asked to write the same text on a blank A4 paper in their own handwriting.

Handwriting samples were taken from a total of 70 people. The dataset to be applied to machine learning algorithms was obtained by extracting the features from the handwriting samples with image processing methods. Section 3 Methods Used for Feature Extraction describes the feature extraction process in detail. The values in the dataset were normalized to the range of 0-1 by applying the min-max normalization method.

2.2. Personality test

The Adjective-Based Personality Test used in the study was developed by Bacanlı et al. in line with the Five Factor Personality theory [10]. The scale consists of 40 items and can be completed in 10-15 minutes by the participants. In practice; users are expected to mark the ones closest to them from the 40 adjectives given as two opposite poles. The choices are (1) Very appropriate, (2) Fairly appropriate, (3) Somewhat appropriate, (4) Neither appropriate, nor appropriate, (5) Somewhat appropriate, (6) Fairly appropriate, and (7) Very appropriate. The original Adjective-Based Personality Test consists of five dimensions: (1) Neuroticism-7 items, (2) Extraversion-9 items, (3) Openness to Development-8 items, (4) Agreeableness-9 items, and (5) Responsibility-7 items.

In this study, in the light of the personality analysis obtained from the handwritings, the items were correlated separately by a specialist psychologist and evaluated by taking the average values of the items, depending on whether they were suitable for personality types or not. Finally, the correlation of the acquired personality types with the expert assessment was examined.

2.3. Machine learning algorithms

2.3.1. Naive Bayes classifier

It is a simple method based on Bayes' theorem. It gives good results especially when the number of features in the dataset is high. Therefore, it is widely used in the classification of texts. Despite its simplicity, NB classifier can achieve comparable performance with complex classification methods such as decision tree and neural network classifier. NB explicitly calculates probabilities for classifier hypotheses. In this respect, it has an advantage over algorithms that do not use probability. During training, each example contributes to the probability of the hypothesis. Naive Bayes classifier is based on Bayesian formula given in Equation 1.

$$P(A|B) = P(B|A)P(A)/P(B) \quad (1)$$

Where,

- $P(B|A)$: The probability that B is true given A.
- $P(A|B)$: Given B, the probability that A is true.
- $P(A)$: The probability that A is true.
- $P(B)$: The probability that B is true.

2.3.2. Decision trees

Decision trees search the hypothesis space using intersection combinations and try to reach the hypothesis that best fits the dataset. The expressive power of the hypotheses expressed as an intersection combination is high. The first classification application of decision trees was with the ID3 algorithm [11]. Later, the version C4.5, which can also handle continuous values, has emerged. One of the advantages of decision trees is that the tree formed as a result of the training is understandable by people. The internal structure of other machine learning algorithms is incomprehensible to humans. While creating the decision tree, the entropy (2) and information gain (3) are used in the selection of the next node.

$$Entropy(S) = -\sum_{i=1}^c p_i \log_2(p_i) \quad (2)$$

$$Gain(S, A) = Entropy(S) - \sum_{v \in Values(A)} \frac{|S_v|}{|S|} Entropy(S_v) \quad (3)$$

We used "gini" index (4) for the measure of split quality in the implementation of Decision Tree.

2.3.3. Random forest

The random forest algorithm is based on the logic of creating small decision trees where the output of all of them are combined, rather than a single large decision tree. Thus, a more powerful classifier is obtained with the ensemble logic. The algorithm used to generate small decision trees in a random forest is the same as for normal decision trees. The difference in random forest is how the dataset is used when creating the trees. First, a separate dataset is created by randomly selecting the rows in the dataset. The same row may appear in a new set more than once. In addition, a few randomly selected features are used in the new dataset, not all features.

Thus, training of each tree in the forest is done with a new dataset randomly selected from the original dataset and also with randomly selected features from the features in the new set. In this way, several small trees are formed, varying with the size of the dataset and the number of features. Since the bootstrapping of new datasets is done by random selection, some rows may not be selected at all during this process. This is called out-of-bag. These lines are then used to measure the performance of the random forest. During the creation of small decision trees in the random forest, the Gini Index (4) criterion is generally used for the selection of features to be placed in the nodes [12].

$$Gini = 1 - \sum_{i=1}^c (p_i)^2 \quad (4)$$

2.3.4. Support vector machines

The original version of the support vector machines algorithm provides linear classification of data belonging to two different classes. In this algorithm, there is the concept of margin, which is used to separate the samples in the dataset from each other. Linear classifiers such as Perceptron classify data by separating them with a single linear line [13]. Therefore, this method provides a rough classification and is likely to fail to classify new incoming data. In the SVM method, on the other hand, there is a margin instead of a line separating the data from one another. Margin is the name given to the area between two parallel lines. The SVM algorithm has to keep the classification error to a minimum while maximizing this margin. This is a classic optimization problem. In Figure 1, the margin is shown in yellow. There are data belonging to the classes on two parallel border lines indicated by the dashed line. These points are called support vectors. The SVM method takes its name from these vectors.

2.3.5. Logistic regression

Logistic regression is a machine learning algorithm used in binary classification problems (when the target is categorical). Logistic regression basically uses a logistic function defined in the function to model a binary output variable [15]. The purpose of Logistic Regression is to discover the link between the features and the probability of a particular outcome. In the logistic function equation (5), x is the input variable.

$$Logistics\ function = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (5)$$

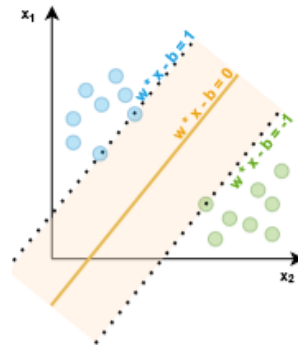


Figure 1. Representation of margin and support vectors for two-dimensional space [14]

2.3.6. XGBoost

Boosting means combining several weak learners to obtain a stronger learner. The boosting methods basically train predictors sequentially and add them to an ensemble, each one trying to correct its predecessor. The gradient boosting method trains the new predictor using the residual errors of the previous one and uses gradient descent over an objective function to minimize prediction errors in the next model. Gradient Boosting Decision Trees (GBDT) method train multiple shallow decision trees and the final prediction is obtained by integrating all tree predictions.

XGBoost algorithm uses Classification and Regression Tree (CART) as the elementary tree. The algorithm improved the optimization method of the cost function on traditional GBDT, and introduced a regular term to speed up training and reduce overfitting. XGBoost also includes instance and feature sampling as well as parallel histogram algorithm.

The objective function of XGBoost for K trees can be defined as

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^N Cost(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{i=1}^K \Omega(f_i) \tag{6}$$

Where the first term is usually the mean squared error, while the second term is

$$\Omega(f_i) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda |\omega|^2 \tag{7}$$

Where T denotes the number of leaves in each tree and γ is used to penalize T to avoid overfitting. The second term provides $L2$ regularization where ω is the weight scores of the leaves and λ is used to punish ω to improve the generalization performance.

For the t -th iteration, the F_{obj} objective function can be written according to Taylor series expansion and approximated as

$$F_{obj}^t = \sum_{i=1}^N Cost \left[y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t^2(x_i) \right] + \Omega(f_t) \tag{8}$$

Where, $g_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}} Cost(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})$ is the first order gradient and $h_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}^2 Cost(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)})$ is the second order gradient of the cost function. By means of h_i , the objective function can quickly converge to the optimal value [16].

2.3.7. LightGBM

LightGBM is a decision tree based ensemble learning method which uses the histogram algorithm to find the best split point and leaf-wise strategy for tree growing with depth limit [17]. In Figure 2, the growth of the tree by depth is shown. It uses the same basic principles of XGBoost like bagging, early stopping, regularization, multiple loss functions, etc. Unlike XGBoost, LightGBM does not use sorted features to find the optimal split points. Instead of this, it utilizes an optimized histogram-based algorithm which improves training efficiency and memory usage. During training, the histogram-based algorithm buckets the continuous feature values into discrete bins and the feature histograms are

constructed using these bins.

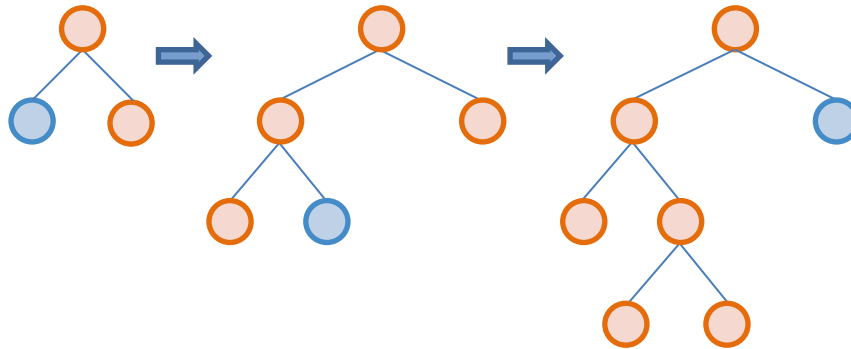


Figure 2. Leaf-wise tree growth

Since the number of bins is much smaller than the number of samples, histogram building increases the computational complexity. To remedy this situation, LightGBM use two new techniques called Gradient-Based One-Side Sampling (GOSS) and Exclusive Feature Bundling (EFB) to reduce both the number of samples and features, respectively. LightGBM uses GOSS to keep the data instances with larger gradients while performing random sampling on the instances having small gradients. This instance-based weighting strategy for training next model is also used by Adaboost algorithm. However, XGBoost uses residual errors of the previous tree for the next model instead of instance weights. The other technique which makes LightGBM more efficient is EFB. This technique merges exclusive features into a single feature thus achieving dimensionality reduction to improve efficiency in histogram building.

The other novelty in LightGBM is that the trees grow in leaf-wise manner with depth limitation instead of the traditional level-wise growth. The leaves with the greatest split gain at each iteration is selected. Since this strategy may easily cause overfitting by growing the tree much larger, the depth of tree must be set in LightGBM to improve accuracy and avoid overfitting [18]. As a result, LightGBM uses less memory, reduces training time of the XGBoost model, and improves accuracy. It is well suited for dealing with problems involving large amounts of data [19].

3. Methods Used For Feature Extraction

The steps applied for features extraction from handwritten images are given below.

1. Load the hand writing image
2. Locate the word frames
3. Calculate the average of the spaces between the word frames
4. Determine the lines
5. Calculate the average spaces between the lines
6. Determine the left margin from the left most pixel of the left most word frame
7. Determine the right margin from the right most pixel of the right most word frame
8. Determine the top margin from the top most pixel of the top most word frame
9. Determine the bottom margin from the bottom most pixel of the bottom most word frame
10. Calculate the layout of the page using the left, right, top and bottom margins
11. Determine the pen pressure using the average of the gray level values
12. Determine the slope of the text using the minimum area rectangle method

For personality analysis, inferences were made on the handwriting samples by using the features expressed as items below.

3.1. Right, left, top and bottom margins of the page

Rectangles drawn around key components such as words and letters in the handwritten image were used to calculate the margins of the page. Figure 2 shows the plotting of the right, left, upper and lower margins.

- Left margin: The left edge coordinate of the leftmost rectangle of the resulting rectangles
- Right margin: The rightmost coordinate from the right edges of the resulting rectangles
- Upper margin: Coordinate where the upper edge of the resulting rectangles is lowest
- Bottom margin: Coordinate where the bottom edge of the resulting rectangles is highest

Then, the following steps determines the personality:

- If the width on the right side of the page is too large; lively and active, if the width is small; serious and cautious personality
- If the left part is too wide; fearful of risk, if the width is small; it shows an impatient personality.
- If the width is too high at the top of the page; cautious, if the width is small; an impatient personality
- If the width is too wide at the bottom, thin in emotions and behaviors, if the width is less; it shows a nervous, high economic anxiety personality.

3.2. General layout

Equation 6 is used to check if the page is in a certain layout.

$$Page\ Layout = \left(\frac{LM + RM}{2} + \frac{UM + LOM}{2} \right) / 2 \tag{9}$$

Where, LM is Left Margin, RM is Right Margin, UM is Upper Margin and LOM is Lower Margin. Based on the formula, the average spacing on the page margins means that:

- If it is less than 10%; shy, introverted familial personality
- If it is between 10% and 25%; balanced and harmonious personality
- If it is more than 25%; Shows generous, extroverted personality.

According to the rectangles drawn around the basic components such as words and letters in Figure 3; plotting the right, left, upper and lower margins is shown.

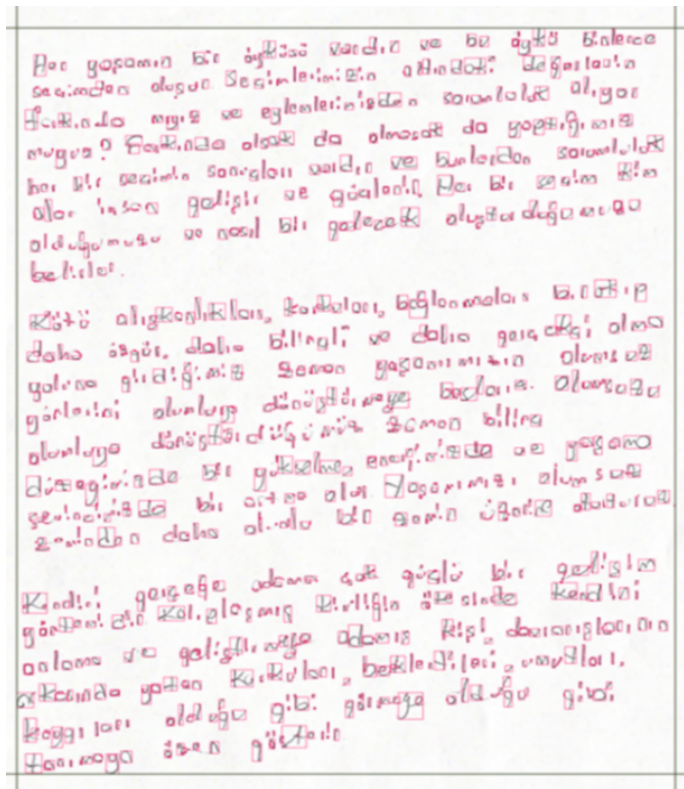


Figure 3. Indication of margin lines

3.3. The amount of space between words

After the words were identified in the handwriting, the spaces between the words and their averages were found. In Figure 4, the detected words and their numbering according to the lines are shown. If there is too much space between words; then it means introverted, fond of freedom person. If the space is less; it shows a sociable and active personality.

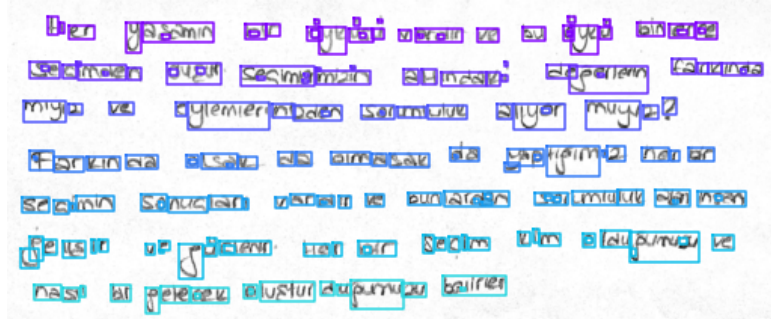


Figure 4. Indication of spaces between words

3.4. The amount of space between lines

After the words were identified, the lines formed by the words were found as shown in Figure 5. The spaces between these lines represent the spaces between the lines. Therefore, the average spaces between the lines were calculated.

If there is too much space between the lines; the tendency of the person to look from a calm and broad perspective is high. If it is less; this indicates a personality that loves movement and crowds.

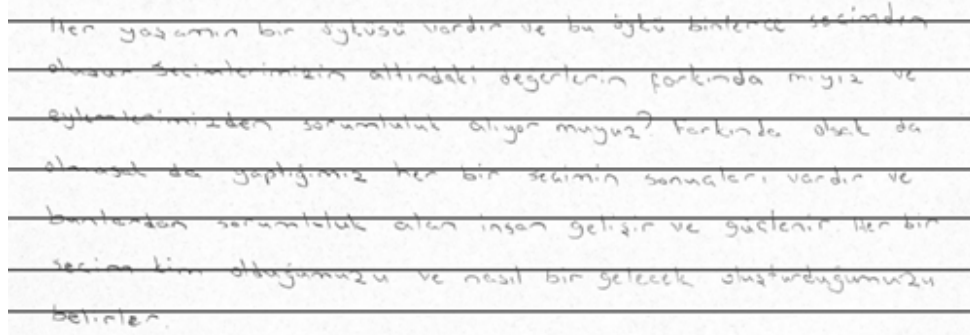


Figure 5. Indication of spaces between lines

3.5. Pressure applied to the pen

The average of the gray level tones in the text was found by calculating the closeness to black. If the pressure applied to the pen is too much; the person is stressed, tense and irritable. If it is low; this shows a fragile and graceful personality.

3.6. Slope of text

In order to find the slope of the entire text, the angle that the text makes with respect to the y-axis is calculated. If the slope of the text is downwards, it show pessimistic personality. Upward slant indicates an optimistic, straight, balanced personality.

4. Experimental Results

The first 10 rows of the dataset obtained by calculating all input characteristics for each person are shown in Table 1. Therefore, there were 13 input features in the dataset which were obtained by applying the relevant Open CV library functions to handwritten images as discussed in Section 3.

Table 1. Input properties of the dataset acquired

Slope	Press	Left Margin	Right Margin	Upper Margin	Lower Margin	Word Spacing	Line Spacing	Page Layout
2.2	247	266	146	147	1316	20	179	469
1.8	247	77	155	174	214	42	465	155
1.9	249	588	345	742	3120	54	106	1199
0.6	245	229	22	731	1817	13	154	700
0,6	245	53	111	42	800	1	32	252
2	244	62	0	25	166	53	79	63
1.2	248	693	0	466	2220	38	179	845
12.4	249	0	146	0	2418	3	97	641
0.5	250	549	254	426	3363	35	105	1148

Table 2 gives the personality traits suggested by the graphology. These were used as the outputs of the machine learning algorithms depending on the input characteristics given in Table 1.

Table 2. Output values obtained from personality analysis

Optimistic	Balanced	Stressful	Impatient	Leery	Uneasy	Emotional	Introvert	Extrovert	Calm

Therefore, the dataset was created by combining the personality traits shown in Table 2 to the corresponding inputs of Table 1. The threshold values of the input properties given in Table 3 were used to determine the personality outputs. The thresholds are subjective choices representing the general characteristics of the collected handwritings. For example; the slope threshold was chosen by considering the handwritings on which the lines are apparently slant. The press threshold was chosen by looking at the handwritings which were written by applying relatively higher pressure than the others and so forth. Although, the threshold values are subjective, they can be used in classification of new handwriting samples. The assumption is that the same steps proposed in this study will be used to determine the personality from the new handwritings.

Table 3. The threshold values and personality outputs

Input feature	Threshold value	Personality output
Slope	>1.5	Optimistic
Press	<248.8	Stressful
Left Margin	<88	Impatient
Right Margin	>100	Balanced
Upper Margin	>342	Leery
Lower Margin	<875	Uneasy
Lower Margin	>875	Emotional
Word Spacing	>20	Introvert
Line Spacing	>171	Calm
Page Layout	>1000	Extrovert

The performance results of the machine learning algorithms were obtained using the parameters given in Table 4. During our experiments, these parameters were observed as the ones which mostly effected the performance of the algorithms. The values of the parameters given for each algorithm provided the highest scores of performance metrics for the respective algorithm. Some of the parameters in Table 4 have default values already provided by the Python implementation. In our evaluation, we changed the values of these ones to other options or values. However, we observed that the performance of the algorithms decreased in those cases. Therefore, the parameters default values retained. There are other parameters of the algorithms as well, but we did not touch the remaining default parameters of the algorithms.

Table 4. Parameters used in machine learning algorithms

Algorithms	Parameters used
Naive Bayes	priors=None, var_smoothing=1e ⁻⁵
Support Vector Machine	C=5, cache_size=200, coef0=0.02, decision_function_shape=ovr, degree=3, gamma=scale, kernel=poly, max_iter=-1, probability=False, random_state=1, shrinking=True, tol=0.001
Logistic Regression	C=10, fit_intercept=True, intercept_scaling=1, max_iter=300, multi_class=auto, penalty=None, random_state=1, solver=lbfgs, tol=0.0001
Decision Tree	Ccp_alpha=0.07, criterion=gini, min_samples_leaf=1, min_samples_split=3, random_state=1, splitter=best
Random Forest	bootstrap=True, ccp_alpha: 0.03, criterion=gini, min_samples_leaf=1, min_samples_split=2, n_estimators=100, oob_score=False, random_state=1, warm_start=False
LightGBM	boosting type=dart, colsample_bytree=1.0, learning_rate=0.15, max_depth=-1, min_child_samples=10, min_child_weight=0.01, min_split_gain=0.12, n_estimators=80, n_jobs=-1, num_leaves=10, reg_alpha=0.003, reg_lambda=0.003, subsample=0.8, subsample_for_bin=200
XGBoost	booster=gbd, gamma=1, enable_categorical=False, learning_rate=0.12, min_child_weight=0.01, n_estimators=80

The 3-fold cross-validation method was applied to the machine learning algorithms. Thus, performance metrics were obtained separately for each personality trait. The comparison of the machine learning algorithms according to the average of the performance metrics is given in Figure 6.

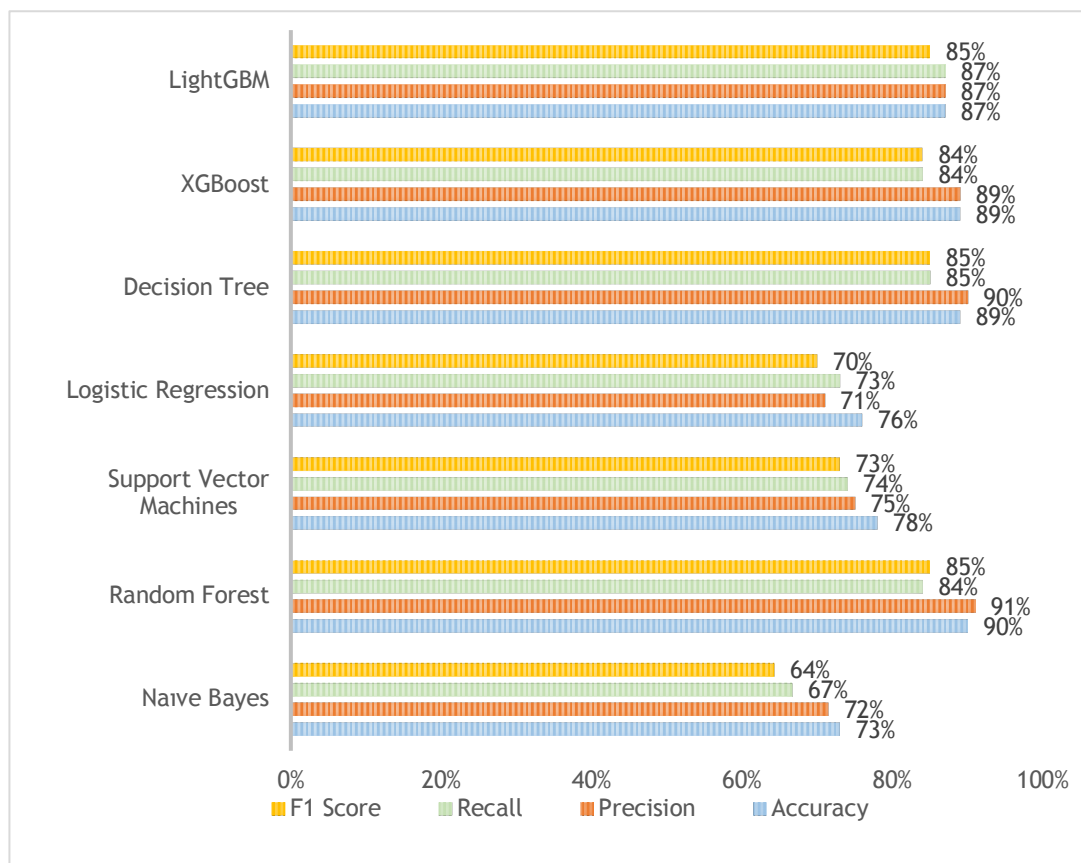


Figure 6. Comparing the performance of algorithms

According to the results given in Figure 6, the Random Forest algorithm gave the best result according to the average of the performance metrics. The accuracy, precision, recall and F1 score values were found to be 0.90, 0.91, 0.84 and 0.85, respectively. The closest successful result to this belongs to the Decision Tree algorithm. The XGBoost and LightGBM were the next most successful algorithms. XGBoost gave better results than LightGBM in terms of accuracy and precision. However, LightGBM had higher recall and f1-score values than the values of XGBoost. The XGBoost algorithm outperform other algorithms for large datasets with sparse set of features [16]. On the other hand, the methods used in LightGBM algorithm provide performance improvement in terms of accuracy, memory

consumption and training time, especially for large datasets [17]. Therefore, since our dataset has small number of instances and features, we observed lower performances for these algorithms in our experiments. The most unsuccessful algorithm was found to be Naive Bayes of which performance criteria are 0.73, 0.72, 0.67 and 0.64, respectively. The performance metrics of Random Forest algorithm for each personality feature and their averages are given in Table 5.

Table 5. Results of Random Forest algorithm

Personality	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
Optimistic	0,86	0,78	0,83	0,78
Balanced	0,86	0,93	0,87	0,89
Stressful	0,89	0,76	0,83	0,70
Impatient	0,96	0,94	1,00	0,97
Leery	0,93	0,96	0,95	0,95
Uneasy	0,91	0,89	0,64	0,69
Emotional	0,93	0,97	0,89	0,92
Introvert	0,89	0,94	0,89	0,91
Extrovert	0,88	0,96	0,76	0,83
Calm	0,91	0,92	0,78	0,84
Average	0,90	0,91	0,84	0,85

According to Table 5, it is seen that the results of the "Random Forest" algorithm for the "impatient" and "leery" features are slightly more successful than the other features.

5. Conclusion

The dataset was applied to the machine learning algorithms and their performances were compared. Considering the Accuracy, Precision, Recall and F1 Score criteria in Figure 6; NB algorithm was found to be the most unsuccessful algorithm. NB algorithm was followed by SVM and Logistic Regression algorithms, respectively. The RF was found to be the most successful algorithm according to accuracy, precision and f1-score values. On the other hand, LightGBM algorithm had the highest recall score value.

The personality test given by a specialist psychologist was applied to 39 people in total. When the results obtained from these tests were compared with the results obtained from handwriting analysis, it was seen that there was a 73% match. The results of 28 of these tests are the same as those from handwriting analysis. The comparison of our study with other similar studies in the literature in terms of dataset size, extracted features, classification algorithms and accuracy results is given in Table 6.

According to Table 6, most of the studies used different numbers of handwritten datasets that they created. Two of the studies used ready datasets, namely EMNIST and CEDAR. The accuracy rates are ranging from %52 to %100 with varying evaluation criteria based on the extracted features. The features used in the studies are categorized in two classes, namely text layout based and letter shape based. Text layout based features are generally the spaces between words and lines, the margins of the handwritten text. The letter shape based features depend on the letter and its silent characteristic. The other mostly used features were pen pressure and slant of the text.

Machine learning methods applied to the features were mainly ANN, SVM, CNN, k-nearest neighbors (KNN). Apart from these, direct image processing methods have been used to obtain accuracy results in a few studies. There are very few studies using specialist psychologists. In our study, higher accuracy was obtained than most studies in the literature. The accuracy value obtained for RF is 90%. Other values are; 91% precision, 84% recall and 85% f1 score. As a feature study, we will include letterform features in the feature set and increase the size of the dataset to achieve higher accuracy results.

Table 6. Comparison of our study with the literature

Reference	Dataset	Feature Extracted	Methods	Result
Champa Et Al 2010	120 handwriting	Slant of the writing, pen pressure, baseline, letter 't', letter 'y'	Polygonalization method, rule-based technique, gray level threshold value	87.2% average accuracy
Santana Et Al 2010	70 handwriting	Vertical position, pen pressure, spacing between letters, thinning area and letter 'a'	Artificial neural networks and Support Vector Machine	A success rate of 92%
Djamal Et Al 2013	125 handwriting	Spacing between words and lines, zone domination, margin	Multi-structure algorithm and multiple ANN	87-100% using multi-structure algorithm, 52-100% using ANN
Vásquez Et Al 2013	100 handwriting	Slant of the writing, pen pressure, length of initial and final feature, spacing between letters, calligraphic box, and cohesion in writing.	A new method that is digitized and classified by neural networks with a decision fusion block.	A success rate of 94.6%
Fallah And Khotanlou 2016	70 handwritten	Text-dependent features like character size, margin of page, line space, word space	GDA algorithm and MLP neural network	76% accuracy
Sen And Shah 2017	75 handwriting	Word spacing, page margin, baseline, size letter 'i', slant	Image processing techniques	95% accuracy
Gavrilescu And Vizireanu 2018	128 handwriting	Baseline, connecting strokes, word slant, writing pressure, letter 't', letter 'f', Space between the lines	Neural Network	84.4% intra subject, 80.5% inter subject.
Fatimah Et Al 2019	128 handwriting	Space between lines and words, slope, margin, dominant zone, four specific letters ('a', 'g', 's', 't')	Structured approach, CNN	%82.5-100 structured approach, %98 CNN
Chitlangia And Malathi 2019	50 handwriting	Histogram of oriented gradient (HOG)	Support Vector Machine	80% accuracy
Saraswal And.Saxena 2022	EMNIST dataset	Letter size, word spacing, slant of words, pen pressure, baseline, space between words and letter	KNN	89% accuracy
Alamsyah 2022	CEDAR dataset	No feature extraction. A ready dataset is used.	CNN	80.88% accuracy
Our Study	70 handwriting	Page margins, general layout, pen pressure, slant, space between words and lines	Random Forest	90% average accuracy

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] E. W. Robertson, *Fundamentals of Document Examination*, Chicago: Nelson-Hall Publishers, 1991.
- [2] G. Sheikholeslami, S. N. Srihari, and V. Govindaraju. "Computer aided graphology," Master's thesis, State University of New York, Buffalo, 1995.
- [3] H. N. Champa and K. R. AnandaKumar, "Automated Human Behavior Prediction through Handwriting Analysis," *2010 First International Conference on Integrated Intelligent Computing*, Bangalore, India, pp. 160-165, 2010. doi:10.1109/ICIIC.2010.29
- [4] S. H. Fatimah, E. C. Djamal, R. Ilyas and F. Renaldi, "Personality Features Identification from Handwriting Using Convolutional Neural Networks," *2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 119-124, 2019. doi:10.1109/ICITISEE48480.2019.9003855.
- [5] O. Santana, C. M. Travieso, J. B. Alonso and M. A. Ferrer, "Writer identification based on graphology techniques," in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 35-42, June 2010. doi:10.1109/MAES.2010.5525319
- [6] J. L. Vásquez, C. M. Travieso and J. B. Alonso, "Using calligraphies features for off line writer identification," *2013 47th International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*, Medellin, Colombia, pp. 1-6, 2013.

doi:10.1109/CCST.2013.6922062.

[7] A. H. Garoot, M. Safar and C. Y. Suen, "A Comprehensive Survey on Handwriting and Computerized Graphology," *2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), Kyoto, Japan*, pp. 621-626, 2017. doi:10.1109/ICDAR.2017.107

[8] A. Anand, D. Patil, S. Bhaawat, S. Karanje and V. Mangalvedhekar, "Automated Career Guidance Using Graphology, Aptitude Test and Personality Test," *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCCBEA), Pune, India*, August 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCBEA.2018.8697642

[9] V. Patil and H. Mathur, "A Survey: Machine Learning Approach for Personality Analysis and Writer Identification through Handwriting," *2020 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India*, pp. 1-5, February 2020. doi:10.1109/ICICT48043.2020.9112449

[10] H. Bacanlı, T. İlhan and S. Aslan, "Beş faktör kuramına dayalı bir kişilik ölçeğinin geliştirilmesi: sifatlara dayalı kişilik testi (SDKT)". *The Journal of Turkish Educational Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 261-279, January 2009.

[11] J. R. Quinlan, *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1993.

[12] Z. Wu, W. Lin, Z. Zhang, A. Wen and L. Lin, "An Ensemble Random Forest Algorithm for Insurance Big Data Analysis," *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), Guangzhou, China*, pp. 531-536, 2017. doi:10.1109/CSE-EUC.2017.99

[13] F. Rosenblatt, "The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain," *Psychological Review*, vol. 65, no. 6, pp. 386-408, 1958. doi:10.1037/h0042519

[14] B. E. Boser, I. Guyon and V. N. Vapnik, "A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers," *Proceedings of the 5th Annual Workshop on Computational Learning Theory (COLT'92), Pittsburgh*, pp. 144-152 July 1992. doi:10.1145/130385.130401

[15] J. Tolles and W. Meurer, "Logistic Regression: Relating Patient Characteristics to Outcomes.," *JAMA*, vol. 316, no. 5, pp. 533-534. August 2016. doi:10.1001/jama.2016.7653

[16] T. Chen, C. Guestrin, "Xgboost: A scalable tree boosting system," in *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 785-794, August 2016. doi:10.1145/2939672.2939785

[17] K. Guolin, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, Q. Ye and T. Liu, "LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree," in *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, pp. 3146-3154, December 2017.

[18] D. Zhang and Y. Gong, "The Comparison of LightGBM and XGBoost Coupling Factor Analysis and Prediagnosis of Acute Liver Failure," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 220990-221003, December 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.3042848.

[19] A. Shehadeh, O. Alshboul, R.E. Al Mamlook, O. Hamedat, "Machine learning models for predicting the residual value of heavy construction equipment: An evaluation of modified decision tree, LightGBM, and XGBoost regression," *Automation in Construction*, vol. 129, pp. 1-16, September 2021. doi:10.1016/j.autcon.2021.103827

[20] E. C. Djamal, R. Darmawati and S. N. Ramdhan, "Application image processing to predict personality based on structure of handwriting and signature," *2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), Jakarta, Indonesia*, pp. 163-168, November 2013. doi:10.1109/IC3INA.2013.6819167

[21] B. Fallah and H. Khotanlou, "Identify human personality parameters based on handwriting using neural network," *2016 Artificial Intelligence and Robotics (IRANOPEN), Qazvin, Iran*, pp. 120-126, April 2016. doi:10.1109/RIOS.2016.7529501.

[22] A. Sen and H. Shah, "Automated handwriting analysis system using principles of graphology and image processing," *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS), Coimbatore, India*, pp. 1-6, March 2017. doi:10.1109/ICIECS.2017.8276061.

[23] M. Gavrilescu and N. Vizireanu, "Predicting the Big Five personality traits from handwriting," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 57, July 2018. doi:10.1186/s13640-018-0297-3vol

[24] A. Chitlangia and G. Malathi, "Handwriting Analysis based on Histogram of Oriented Gradient for Predicting Personality traits using SVM," *Procedia Computer Science*, vol 165, pp. 384-390, 2019. doi:10.1016/j.procs.2020.01.034

[25] A. Saraswal and U. R. Saxena, "Personality Trait Prediction Using Handwriting Recognition with KNN," *2022 International Conference on Computational Intelligence and Sustainable Engineering Solutions (CISES), Greater Noida, India*, pp. 551-555, May 2022. doi:10.1109/CISES54857.2022.9844344

[26] D. Alamsyah, Samsuryadi, W. Widhiarso and S. Hasan, "Handwriting Analysis for Personality Trait Features Identification using CNN," *2022 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA), Bandung, Indonesia*, pp. 232-238, July 2022. doi:10.1109/ICoDSA55874.2022.9862910

* This article is an extended version of the paper presented at the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'22)

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



GAZI

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Experimentally Assessing the Wear Characteristics of 3D-Printed PLA and Tough PLA Materials Based on Fused Deposition Modeling

Engin Tan^{a*}

Submitted: 14.06.2023 Revised: 18.07.2023 Accepted: 09.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705065

ABSTRACT

Keywords: Wear, PLA, tough PLA, fused deposition modeling, 3D-printing

^{a*} Pamukkale University,
Faculty of Technology,
Dept. of Metallurgical
and Materials Engineering
20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4441-3678
e mail: etan@pau.edu.tr

*Corresponding author:
etan@pau.edu.tr

This study investigated the wear properties of two commonly utilized polymer materials, PLA (Poly Lactic Acid) and Tough PLA, in additive manufacturing applications. The samples were produced with a 100% infill rate on a 3D printer using Fused Deposition Modeling. Hardness measurements and abrasive wear tests were conducted to analyze the wear characteristics of the samples. The comparison involved parameters such as volume loss, coefficient of friction, and specific wear rate. Additionally, surface roughness measurements were performed to assess the quality of the worn surfaces. Wear maps were constructed to obtain information about the wear mechanisms, and scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy were used to describe the worn surfaces. The results demonstrated that Tough PLA exhibited superior wear resistance compared to PLA. The highest volume loss of 3.75 mm³ was observed in the PLA-5 m/s sample under a 15 N load, whereas the lowest of 0.55 mm³ was in the Tough PLA-1.5 m/s sample under a 5 N load. Depending on the applied load and sliding distances, fatigue, micro-fracture, and micro-cutting mechanisms were identified as contributing factors to the wear process. Furthermore, it was observed that higher applied loads resulted in a significant increase in surface roughness values.

Eriyik Yiğma Modellemeye Dayalı 3B Baskılı PLA ve Tok PLA Malzemelerinin Aşınma Özelliklerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi

ÖZ

Bu çalışma, eklemeli imalat uygulamalarında yaygın olarak kullanılan iki polimer malzemenin, PLA (Poli Laktik Asit) ve Tough PLA'nın aşınma özelliklerini araştırmıştır. Numuneler, Eriyik Yiğma Modelleme kullanılarak bir 3D yazıcıda %100 doluluk oranıyla üretildi. Numunelerin aşınma özelliklerini analiz etmek için sertlik ölçümleri ve aşındırma aşınma testleri yapılmıştır. Karşılaştırma, hacim kaybı, sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranı gibi parametreleri içeriyordu. Ayrıca aşınmış yüzeylerin kalitesini değerlendirmek için yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Aşınma mekanizmaları hakkında bilgi elde etmek için aşınma haritaları oluşturuldu ve aşınmış yüzeyleri tanımlamak için taramalı elektron mikroskopu ve enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi kullanıldı. Sonuçlar, Tough PLA'nın PLA'ya kıyasla üstün aşınma direnci sergilediğini gösterdi. En yüksek hacim kaybı 3,75 mm³ ile PLA-5 m/s örneğinde 15 N yük altında gözlenirken, en düşük hacim kaybı 0,55 mm³ ile Tough PLA-1,5 m/s örneğinde 5 N yük altında gözlemlendi. Uygulanan yüke ve kayma mesafelerine bağlı olarak yorulma, mikro kırılma ve mikro kesme mekanizmaları aşınma sürecine katkıda bulunan faktörler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, uygulanan daha yüksek yüklerin yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, PLA, Tok PLA, Eriyik yiğma Modelleme, 3B baskı

1. Introduction

Additive Manufacturing (AM) has emerged as an adaptable technology, facilitating the creation of intricate components with remarkable accuracy and efficiency. The research dedicated to AM technologies has witnessed a substantial growth in recent years. This technology allows for the successful creation of target prototypes from CAD model information and facilitates the production of small-scale components for system modification, repair, and maintenance [1, 2]. AM technology finds extensive applications across various fields, including manufacturing, engineering, aviation, space, and medicine, due to its exceptional 3D-printing capabilities. AM presents a broad spectrum of processes that harness the capabilities of polymers, ceramics, metals, alloys, and composites. This versatility allows for the development of various types of products and components, catering to diverse industry needs and requirements [3-5]. Among these processes, Fused Deposition Modeling (FDM) stands out for its ability to efficiently and cost-effectively produce high-precision layered structures using polymeric engineering materials [6]. FDM excels in delivering fast production rates while maintaining high dimensional accuracy within narrow tolerances [7]. Despite these advantageous features, the layered production in FDM can introduce different surface roughnesses that may pose challenges to the strength characteristics and ergonomics of the produced parts. In addition to traditional materials like ABS and PLA, FDM technology also accommodates polymer-based materials such as PETG, PEKK, PEI, PPSU, and PC, which offer high strength and thermal resistance [8].

PLA is widely utilized in various industries due to its exceptional strength properties, good surface quality, high printing speeds, and cost-effectiveness. Furthermore, its biocompatibility and biodegradability have propelled it to the forefront as the preferred thermoplastic in sectors ranging from food and cosmetics to biomedical applications [9-11]. However, PLA filaments used in FDM technology have certain drawbacks, primarily brittleness, which negatively impacts wear resistance, fracture toughness, and impact resistance. To address these limitations, the development of Tough PLA with enhanced toughness properties has gained attention in recent years. Tough PLA offers unique material characteristics, including improved toughness and enhanced impact resistance, which are crucial for enhancing engineering applications [12]. Compared to standard PLA filaments, Tough PLA filaments exhibit up to three times higher energy dissipation capacity. In addition, the exceptional flexibility of Tough PLA allows it to withstand high levels of friction and impact, making it highly appropriate for an array of engineering purposes. [13-15].

The wear behavior of PLA and Tough PLA produced using FDM technology has received limited research attention. Karabeyoğlu et al. [16] conducted a study investigating the wear behavior of PLA-copper composites. The study revealed that at low temperatures, the wear mechanism was primarily attributed to the abrasive effect caused by copper particles detaching from the surface. Conversely, adhesive wear properties were observed at high temperatures. İstif [17] examined the dry sliding wear behavior of FDM-produced PLA parts. Two different manufacturing directions were selected for PLA samples. The study found that vertically oriented pins experienced significantly higher weight loss compared to horizontally oriented ones, highlighting the significant influence of layer direction on the wear mechanism. Yilmaz [18] examined the adhesive wear behaviours of 3D-printed PETG, ABS, and PLA materials. It was determined that PLA exhibited the lowest wear performance among all the tested materials, while PETG demonstrated the highest resistance to adhesive wear. Sevil et al. [19] investigated three alternative powder and epoxy based coating techniques to develop the wear resistance of 3D-printed PLA items against surface scratches. Erosive wear tests were performed on the coated samples, revealing that the PLA part coated with aluminum oxide powder exhibited the highest erosion rate, while the garnet-coated PLA specimen demonstrated the lowest erosion rate. In a study by Rajesh et al. [20], the dry sliding abrasive wear behavior of PLA and ABS samples produced using FDM was compared. ABS exhibited a higher wear rate and friction force compared to PLA.

In this study, wear samples were fabricated using commercially available PLA and Tough PLA filaments through the FDM 3D-printing method. Abrasive wear tests were conducted on the produced samples, varying the loads, sliding velocities, and sliding distances. The wear behavior of the samples was assessed by analysing parameters such as coefficient of friction, volume loss, and specific wear rate. Surface roughness assessments were utilized to assess the current condition of the worn surfaces. Additionally, SEM and EDS investigations were used to characterize the worn surfaces. Unlike the existing literature studies, in this study, a wear mechanisms map was created to contribute to the optimization of the wear behavior of PLA and to help determine the appropriate wear conditions.

2. Experimental Procedure

For this study, two filament materials, namely PLA and Tough PLA, were obtained from Porima Polymer Technologies Inc. located in Turkey. Table 1 shows the manufacturing specifications of the filaments as reported by the company. Furthermore, Table 2 describes the physical, thermal, and mechanical features of the filaments.

Table 1. Production parameters of the filaments

Materials	Colors	Diameter (mm)	Processing Temperature (°C)	Platform Temperature (°C)
PLA	Brown	1.75	200-230	60-75
Tough PLA	Black			

Table 2. The physical, thermal, and mechanical features of the filaments

Features	PLA	Tough PLA
Heat Bending Temperature (°C)	55	58
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	55-65
Density (g/cm ³)	1.23	1.22
Melt Flow Index (g/10min)	17.3	17.3
Tensile Strength (MPa)	56	50
Young Modulus (MPa)	2850	2400
Elongation at Break (%)	7	50
Notch Impact Energy (kJ/m ²)	14.2	36

Wear samples of PLA and Tough PLA were fabricated using the FDM method on the Ender 3 Pro 3D printer, with dimensions of Ø10x20 mm. Figure 1 provides a schematic image of the production process, along with a photograph of the printer used. Detailed information regarding the FDM parameters for 3D printing can be found in Table 3.

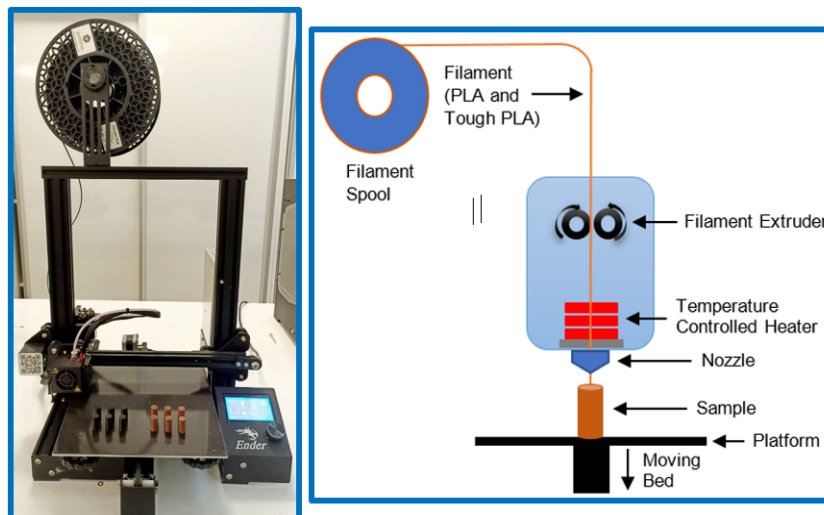


Figure 1. Production process of samples via 3D-printer

Table 3. The physical, thermal, and mechanical features of the filaments

Parameters	PLA	Tough PLA
Platform Temperature (°C)	60	65
Nozzle Temperature (°C)	215	225
Nozzle Diameter (mm)	0.4	0.4
Layer Thickness (mm)	0.20	0.20
Infill Rate (%)	100	100
Print Speed (mm/s)	75	60
Raster angle (°)	+45/-45	+45/-45

Several factors impact the quality of objects created using 3D printing technology, including the cohesiveness among printed layers. Control over the platform temperature is crucial for ensuring optimal part quality. In this study, to avoid distortion and potential thermal stresses, the PLA platform temperature has been fixed at 60 °C and the Tough PLA platform at 65 °C. Notably, the nozzle temperature for Tough PLA was higher than PLA due to its lower viscosity, which increases the risk of clogging during extrusion through the nozzle [21, 22]. Furthermore, Gurralla et al. [23] and Singh et al. [24] have highlighted the significance of the raster angle in reducing damage caused by adhesions between interlayers during the 3D-printing process. Thus, a raster angle of 45°/-45° was selected for this study. The ambient room temperature during printing was maintained between 20 and 25 °C, with a relative humidity of approximately 50%. After completion of the printing process, the 3D-printed samples were stored under laboratory conditions for 96 hours to comply with the ASTM D618 standard. To account for variations in dimensional tolerances resulting from different parameter settings in the 3D printing process, measurements were taken from five different points in the diameter and height regions of each sample using a digital caliper. The dimensional accuracy was determined to be at least 99%.

Hardness measurements were evaluated using the Shore D method, following the ASTM 2240-15 standard guidelines. A Durotronic 1000 Model Shore D-type durometer was used for hardness measurements. Five different measurements were averaged across the diameter sections of the wear samples to ensure consistent hardness values on the sample surfaces.

The abrasive wear tests were conducted following the ASTM G99 standard, employing the pin-on-disc method. The samples were securely fixed onto the Turkeyus PODWT tribometer, as depicted in Figure 2, and subjected to an abrasion test utilizing 800-grit sandpaper.

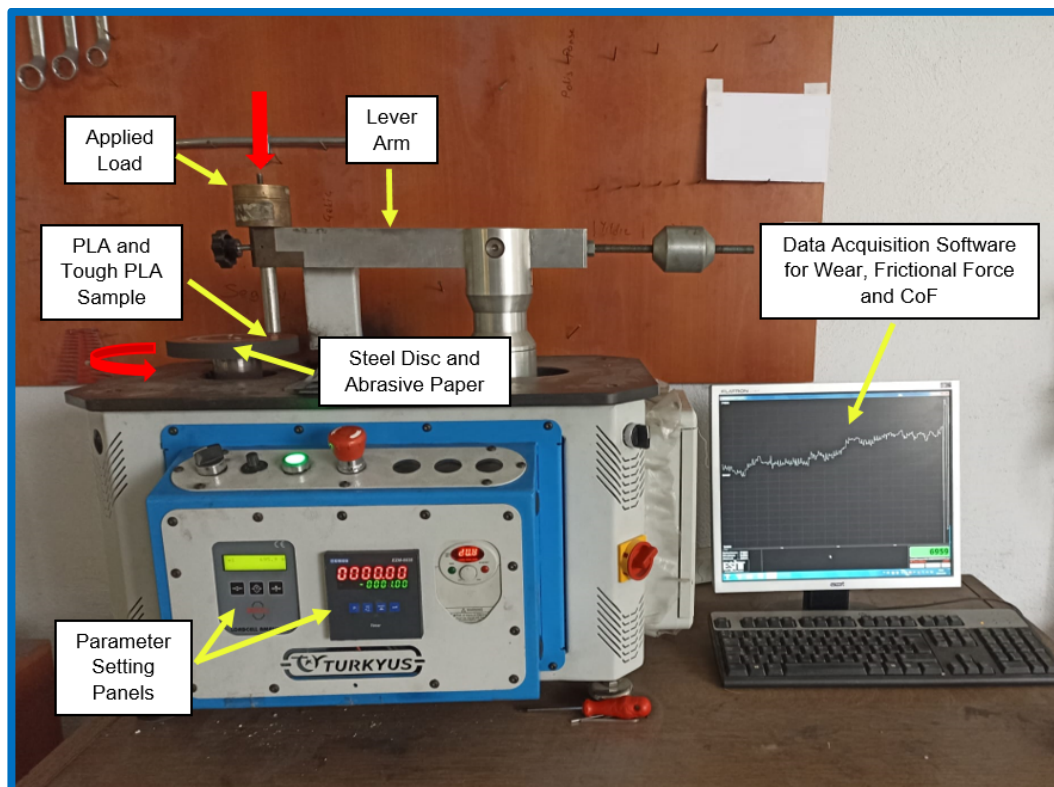


Figure 2. Pin on disc tribometer used in wear tests

The dry sliding wear tests were performed under varying conditions, including 5, 10, and 15 N loads, sliding velocities of 1.5, 3, and 5 m/s, and sliding distances of 100, 200, and 300 m. The friction forces were measured during the wear testing using the Esit Data Logger software, which has been incorporated into the pin-on-disc apparatus. These measurements enabled the determination of the coefficient of friction, volume loss, and specific wear rate. The coefficient of friction (CoF) was calculated using Equation 1, the volume loss (V , mm^3) was evaluated using Equation 2, and the specific wear rate (SWR, $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) was calculated using Equation 3. The obtained wear test results were

then subjected to further analysis.

$$CoF = F/P \quad (1)$$

; F is the friction force (N) and P is the applied normal load (N).

$$V = m/\rho \quad (2)$$

; m is the mass loss (g) and ρ is the density (g/cm^3).

$$SWR = V/P.L \quad (3)$$

; L is the total sliding distance (m) [25].

Surface roughness data were investigated using the Hardway 462 roughness tester to evaluate the condition of the worn surfaces after the wear tests. The wear mechanisms were determined by creating a wear map depending on the volume loss. This map provided valuable information about the specific wear mechanisms that emerged during testing. Characterization analyses were performed using a Zeiss Supra 40VP high-resolution SEM to correlate worn surface morphologies with wear mechanisms.

Furthermore, EDS analyses were conducted to examine the elemental content distributions within the worn surfaces. These analyses yielded valuable information regarding the presence and distribution of various elements on the surfaces that underwent wear.

3. Results and Discussion

3.1. Hardness

A comparison of hardness values between the PLA and Tough PLA samples is illustrated in Figure 3. The PLA sample displayed the highest hardness, measuring 83.6 Shore D with a mean standard deviation of 1.45. Conversely, the Tough PLA sample exhibited the lowest hardness, measuring 79.3 Shore D with an average standard deviation of 0.95. These findings are consistent with previous literature data [13, 15]. Notably, the difference in hardness was not significantly influenced by the layer thickness [1]. However, Tough PLA demonstrated improved layer adhesion, toughness, and surface quality compared to PLA. These favorable properties also contribute to the stability of the measured hardness results [26]. It is worth mentioning that any defects present in the 3D-printed parts, such as openings, cracks, voids, or air gaps, can affect the mean and standard deviation data [27]. The interactions between molecules formed between the additive and the PLA matrix have a direct impact on the hardness of PLA. Hardness rises when the additive is homogenous diffused and distributed throughout the matrix, showing stronger intermolecular interactions. Furthermore, proper filler distribution improves load transmission between layers. Inadequate dispersion of the additive, on the other hand, might result in infill agglomeration, which reduces the interactions between molecules among PLA and the additive [28]. As a result, there is a reduction in hardness.

In conclusion, Tough PLA is formulated with a lower hardness than PLA to optimize its toughness, wear resistance, and impact strength properties.

3.2. Wear behaviours and mechanisms

The wear behaviors of PLA and Tough PLA were investigated in relation to the applied load and volume loss. Figure 4 illustrates the direct influence of the applied load on wear resistance, resulting in increased volume loss. However, it was observed that sliding under high loads can reduce wear, while low loads tend to exhibit a combination of retention and sliding mechanisms [29].

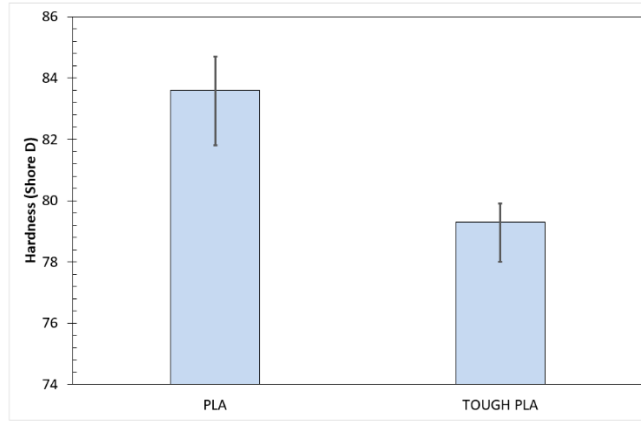


Figure 3. Hardness comparison of FDM 3D-printed wear samples

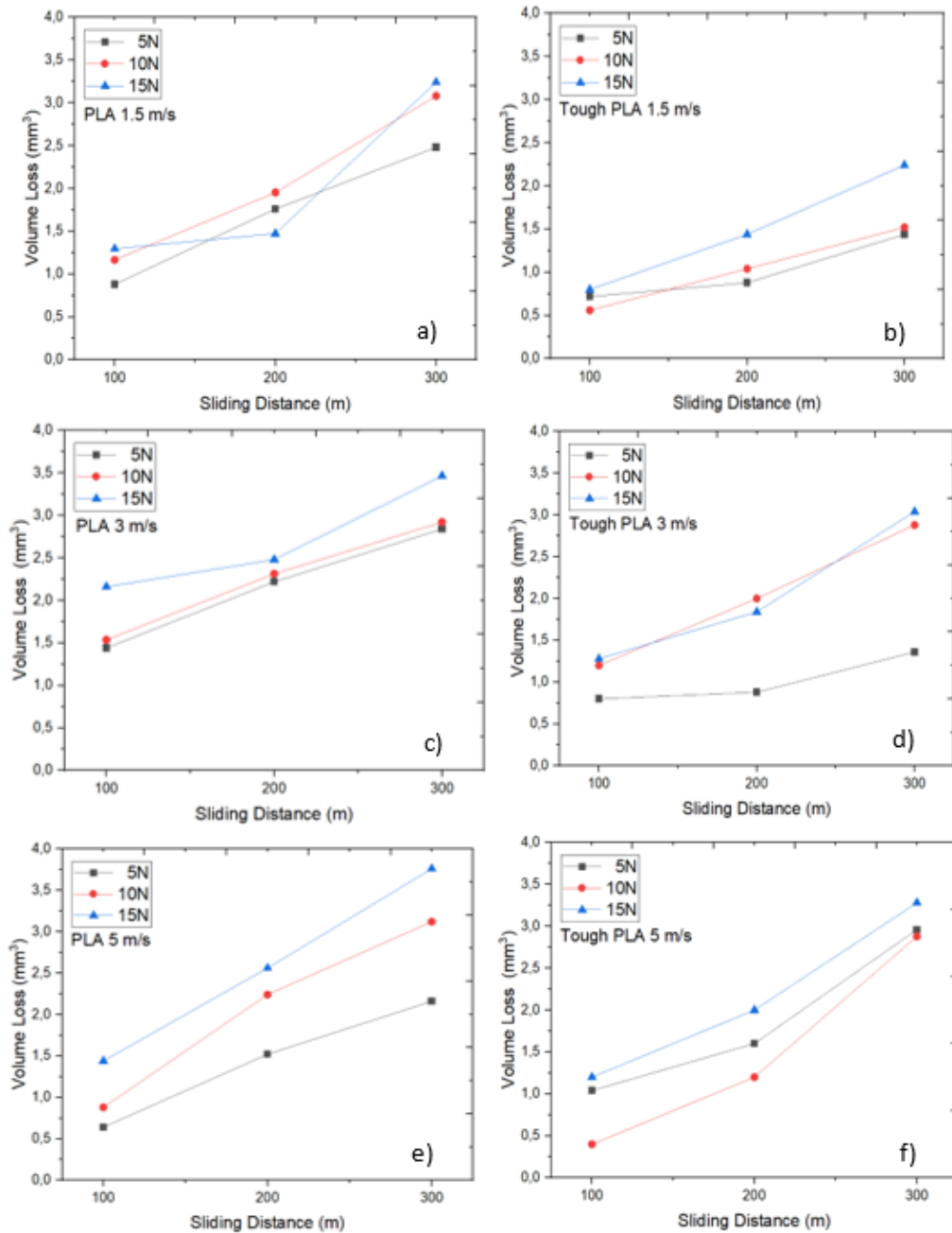


Figure 4. Volume loss of: a) PLA-1.5 m/s, b) Tough PLA-1.5 m/s, c) PLA-3 m/s, d) Tough PLA-3 m/s, e) PLA-5 m/s, f) Tough PLA-5 m/s by distance and load

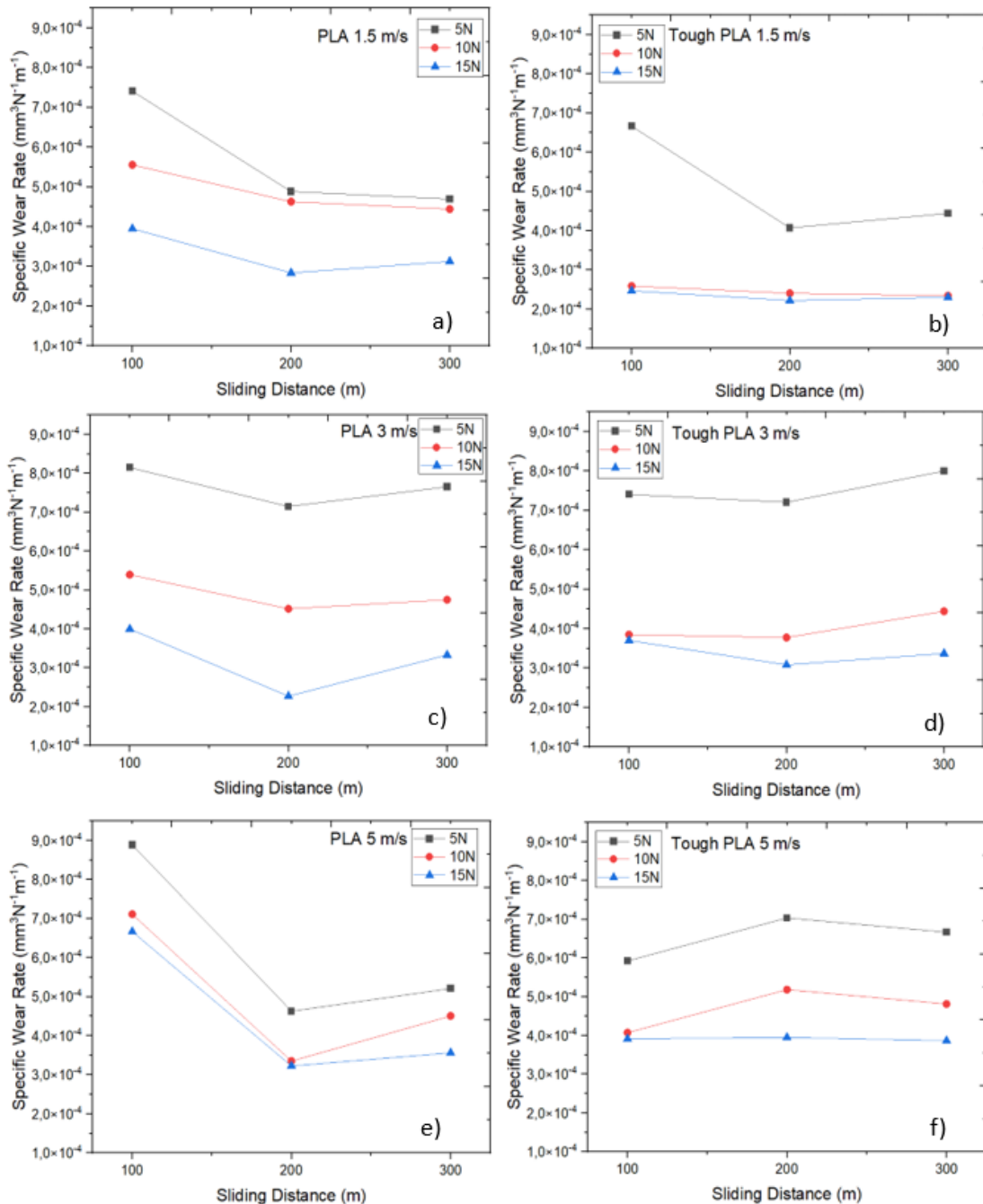


Figure 5. SWR of: a) PLA-1.5 m/s b) Tough PLA-1.5 m/s, c) PLA-3 m/s d) Tough PLA-3 m/s e) PLA-5 m/s f) Tough PLA-5 m/s by distance and load

Conversely, altering the applied normal load leads to a higher SWR value. As previously mentioned, raising the normal load magnifies the kinetic energy engaged in the friction process, which in turn causes the material layers from the polymeric sample to be transferred to the abrasive paper. This phenomenon contributes to a higher rate of wear, as indicated by the elevated SWR value. This transfer contributes to an escalation in the wear rate. Moreover, the generated heat softens the wear surface, resulting in increased sliding resistance and consequently raising the SWR value. The SWR was also assessed for various sliding distances, as depicted in Figure 5. The results suggest that increasing the sliding distances resulted in a decrease in the SWR for PLA and Tough PLA materials. This reduction in wear rate can be attributed to two contributing factors. The decrease in wear rate can be attributed to two factors. Firstly, the surfaces become smoother as the sliding distance increases, resulting in reduced sliding resistance. Secondly, the transferred layers that form during the initial stages of the friction process act as an additional body, effectively functioning as lubricating agent between the surfaces [28, 33]. These combined factors contribute to the decline in the wear rate observed.

CoF is a widely used property for studying the tribological characteristics of engineering materials. Figure 6 presents the CoF values obtained from wear tests conducted on PLA and Tough PLA specimens. The average CoF values range between 0.35 and 0.45. The results indicate a decreasing trend in the average CoF values as the test loads increase. This trend can be attributed to the change in wear mechanisms during testing. Under higher test loads, significant plastic deformation occurs in the initial stages of the wear test. The contact condition in the surface deformation region changes from SiC (abrasive paper)-polymer with partial adhesion to polymer-polymer contact as the sliding period proceeds. Localization of deformation and unevenly distributed partial voids can result in fluctuations in CoF values [2]. The investigation demonstrated that when the normal load is increased, there is a corresponding rise in the CoF due to the generation of heat during the friction process. The generated heat can cause the sample to undergo softening, leading to an increase in the contact region between the surfaces. Chang et al. [34] reported an elevated CoF with rising contact temperature, particularly under high loads. The examination of the experimental data revealed a notable effect of the printing factors on the durability, hardness, and surface characteristics of the components. As a result, these factors directly affect the tribological features displayed by the components. The findings of this research facilitate the selection of appropriate 3D printing settings based on the desired tribological properties, such as CoF and SWR, for the respective parts.

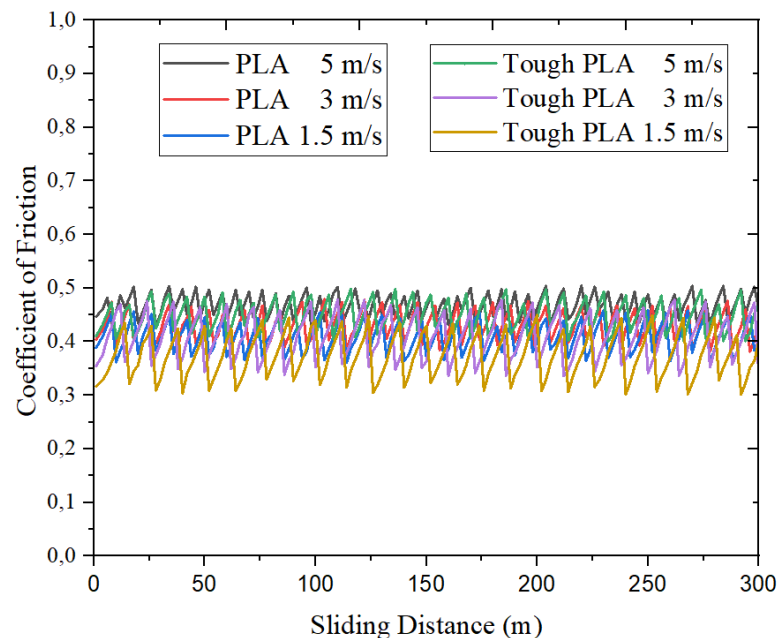


Figure 6. CoF of PLA and Tough PLA by distance

Distinct disparities in the sliding wear characteristics are evident when comparing PLA and Tough PLA materials. Various aspects pertaining to the properties and workability of PLA could be enhanced. These drawbacks encompass inadequate impact strength (low absorbed energy), limited elongation at break (low ductility), low heat deflection temperature (below 60 °C), and challenges in machining (lengthy cycle times and crystallization in processes like injection molding). Employing high-temperature molds becomes necessary to address these concerns [35]. Consequently, PLA exhibits lower wear resistance [36]. The findings from the wear tests further corroborate this observation.

The analysis of the experimental results revealed a notable influence on the wear behavior, extensively discussed within the study. The decline in the CoF can be based on to the sleekness of the specimen surfaces and their interaction with the counter component, specifically noticeable in friction scenarios involving long-distances [37]. Dass et al. [38] proposed that when polymeric samples are subjected to prolonged rubbing against steel discs, the resulting frictional heat can induce localized melting of the polymeric materials. According to their findings, it was observed that the steel disc functions as an intermediate element between the friction surfaces, while a slim polymeric film plays a role in reducing the CoF. A similar phenomenon can be observed in this study, where the SiC paper (abrasive paper),

PLA, and Tough PLA serve as a thin film layer on the sample surface, resulting in a decrease in the CoF.

The volume loss and wear mechanisms map plays an important act in identifying the prevailing mechanisms during wear conditions, enabling the prediction of their impact on the overall wear process. This map is widely utilized for assessing wear mechanisms and their consequences. The increase in sliding distances causes fatigue and micro-fracture mechanisms in wear. In the case of reduced sliding distances, micro-cutting mechanisms occur. The same applies to wear loads. Furthermore, it can be observed that the volume loss decreases at low loads and sliding distances, while it increases at high loads and sliding distances (Figure 7). This information aids in determining suitable wear conditions to enhance wear resistance.

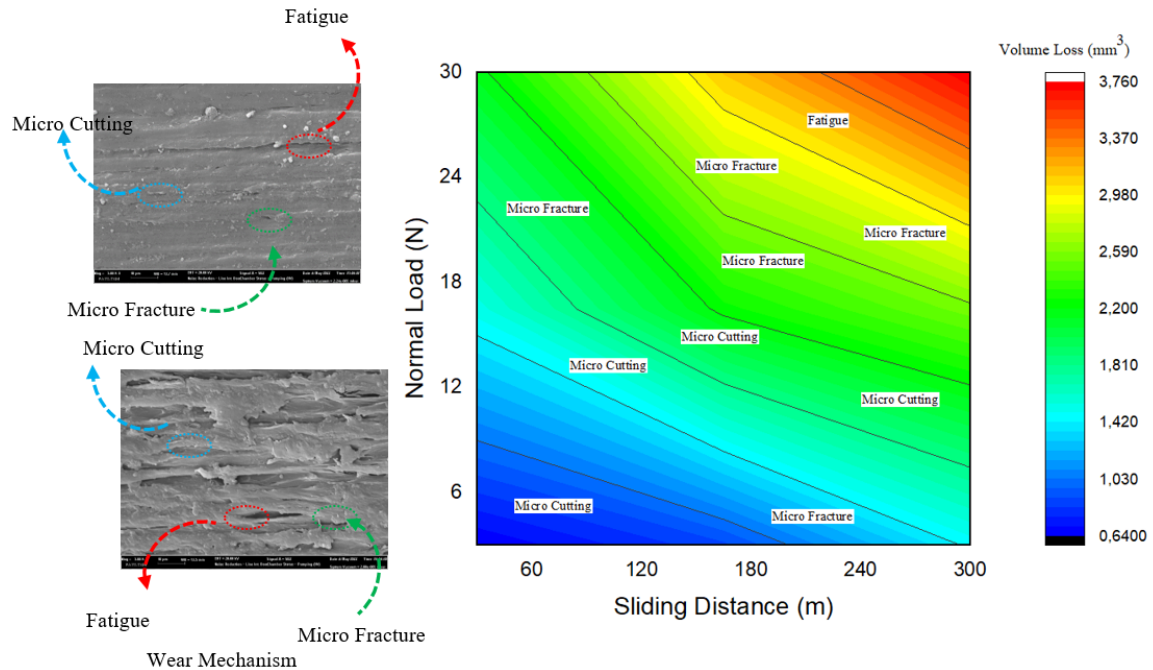


Figure 7. Wear mechanisms map of Tough PLA through volume loss

3.3. Surface roughness analysis

Figure 8 gives the surface roughness results. The data reveals that among the PLA samples, the one with the lowest wear resistance displayed the highest roughness value of $0.981 \mu\text{m}$. On the other hand, the Tough PLA sample, characterized by the highest wear resistance, displayed the lowest roughness value of $0.412 \mu\text{m}$. Particularly, the study observed a significant increase in surface roughness values, particularly under high applied forces. Selecting a 100% infill rate was found to be effective in significantly reducing the measured surface roughness values due to the minimized void volume [2].

Surface roughness has a significant impact on tribological characteristics, affecting them in the following ways: As the surface roughness increases, it reduces the contact area during sliding, leading to elevated pressure and consequently a higher CoF. Conversely, when surface roughness decreases, the sliding contact area expands, leading to a lower CoF. This effect becomes particularly evident in samples with lower loads [29].

When the surface of the test piece exhibits higher roughness, the contact area is diminished, leading to accelerated wear of the superficial layers and, consequently, an increased wear rate. Conversely, an expanded sliding region contributes to a reduced wear rate. This phenomenon has been appropriately described in the tribological investigations conducted on the samples, which included observations of the surface structure under a 15 N load.

The sliding surface of the test piece exhibits a crust texture characterized by peaks and valleys between its layers. These peaks and valleys represent surface roughness, contributing to an overall rough surface. The peaks and valleys of the surface deform during the sliding process, resulting in the building of a different worn surface.

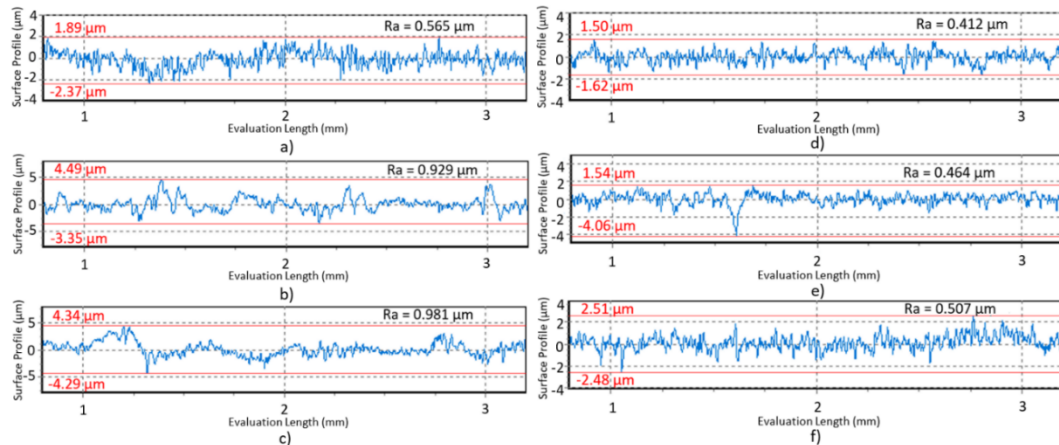


Figure 8. Surface roughness results of: a) PLA-1.5 m/s, b) PLA-3 m/s, c) PLA-5 m/s, d) Tough PLA-1.5 m/s, e) Tough PLA-3 m/s, f) Tough PLA-5 m/s

3.4. Worn surface characterization

The presence of various wear mechanisms, including wear grooves, micro-cutting, micro-fracture, as well as fatigue and plastic deformation, is illustrated in Figure 9 through the SEM analysis of the worn surfaces. These mechanisms are observed in both PLA and Tough PLA samples, with their occurrence dependent on the sliding distance and wear load parameters. Notably, triangular voids are noticeable between the layers throughout the entire thickness of the samples. These voids are likely a result of filament deposition angles between adjacent rasters. SEM image analysis indicated that Tough PLA materials generally exhibit larger voids compared to standard PLA materials (Figure 9). Localized grooves, cavities, and severe abrasion marks were also observed. The development of larger voids in Tough PLA can be caused by a greater amount of plastic deformation as compared with standard PLA, resulting in layer separations. Furthermore, it was observed that the cavities expanded in size as the printing speeds were increased. In the case of Tough PLA samples, gaps between the layers (parallel to the layering direction) were visible. However, it was observed that these gaps closed during production and contact, with plastic deformation increasing under the applied wear load. This study concluded that samples produced with Tough PLA demonstrated improved wear resistance compared to those produced with standard PLA. The higher nozzle temperature also played a role in the superior wear performance of Tough PLA. The varying heating and cooling rates can explain this phenomenon, as PLA was printed at an extrusion temperature of 215 °C while at 225 °C in Tough PLA [14, 39]. Considering the low viscosity of Tough PLA, the increase in extruding temperature resulted in better fluidity and reduced void volume.

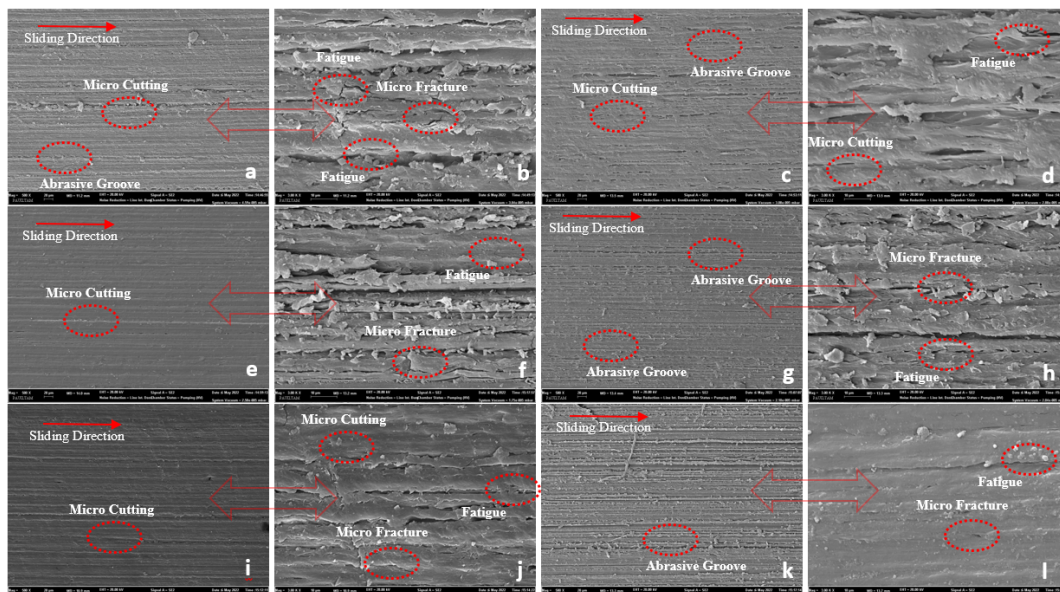


Figure 9. Wear mechanisms of the worn surfaces: (a, b) PLA-1.5 m/s, (c, d) PLA-3 m/s, (e, f) PLA-5 m/s, (g, h) Tough PLA-1.5 m/s, (i, j) Tough PLA-3 m/s, (k, l) Tough PLA-5 m/s (Magnifications are 500x in a, c, e, g, i, k and 3000x in b, d, f, h, j, l)

EDS analysis was performed on the surfaces to gain a particular comment on the effects of wear conditions on wear processes and behavior. The EDS results showed that the presence of abrasive particles in both PLA and Tough PLA samples was not caused by abrasive paper but rather to the formation of polymer-polymer contact areas during the wear test (see Figure 10). SEM-EDS analyses indicated that the wear performance of these samples can be enhanced by optimizing the printing parameters and minimizing internal defects. Parameters such as raster direction, print speed, and nozzle temperature significantly influence the wear resistance of 3D-printed parts. Properly optimizing the process parameters makes it exists to improve the strength and dimensional accuracy of the components by decreasing the gaps formed by the deposited layers [14].

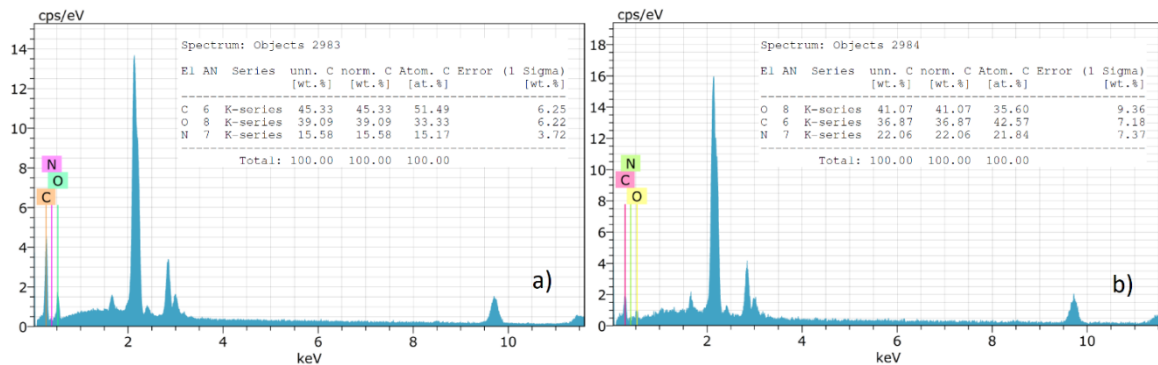


Figure 10. EDS analyses of the worn surfaces: a) PLA-5 m/s, b) Tough PLA-5 m/s

4. Conclusion

The FDM (Fused Deposition Modeling) technique is employed as an efficient and practical means to produce PLA and Tough PLA samples. This method enables the optimization of wear properties within tight tolerances. In this research, the wear characteristics of PLA and Tough PLA materials were thoroughly examined on samples fabricated through 3D printing utilizing the FDM approach. Notably, this study unveils novel insights into the wear mechanisms exhibited by these materials. As a conclusion, the main novel findings are presented following:

- Among the samples produced with 100% infill rate, the PLA sample has a Shore D hardness of 83.6, while the Tough PLA sample has a hardness of 79.3 Shore D.
- Samples produced with Tough PLA showed better wear resistance than those produced with standard PLA.
- The highest volume loss of 3.75 mm³ was observed in the PLA-5 m/s sample under a 15 N load, whereas the lowest volume loss of 0.55 mm³ was observed in the Tough PLA-1.5 m/s sample under a 5 N load. The results support the toughness effect of Tough PLA, with strong interfacial adhesion and a large sliding-deformation tendency with more homogeneously dispersed phases than the PLA matrix.
- Average CoF values tend to decrease with increasing wear load. With the increase of the normal load, the CoF also exhibited an increase.
- In the case of both PLA and Tough PLA samples, increasing the sliding distances reduced the SWR value. However, an increase in the normal load contributes to a higher SWR.
- Based on the detailed surface roughness measurements, it was found that the PLA-5 m/s sample exhibited the highest result of 0.981 μm, while the Tough PLA-1.5 m/s sample displayed the lowest result of 0.412 μm. 100% infill rate led to significantly decreased observed surface roughness values. The surface roughness values increased particularly under high applied forces.
- Analysis of SEM images revealed that, in nearly all samples, Tough PLA materials exhibited larger gaps compared to standard PLA materials.
- The increase in sliding distances causes fatigue and micro-fracture mechanisms in wear. In the case

of reduced sliding distances, micro-cutting mechanisms occur. The same applies to wear loads. Furthermore, it was observed that the volume loss decreases with lower loads and sliding distances, while it increases with higher loads and sliding distances.

Acknowledgment

The author extends their appreciation to Dr. Ismail Ovali for his valuable contributions in providing technical editing and assistance during the writing of this study.

Conflict of Interest Statement

The author declares that there is no conflict of interest.

References

- [1] B. Özlü, O. Pıskı and H. Demir, "Investigation of models produced by rapid prototyping technology solid ground method the dimensional deviations and surface roughness," *Erzincan University Journal of Science and Technology*, vol. 13, no.1, pp. 296-305, March 2020. doi:10.18185/erzifbed.559785
- [2] B. Ergene and Ç. Bolat, "An experimental study on the role of manufacturing parameters on the dry sliding wear performance of additively manufactured PETG," *International Polymer Processing*, vol. 37, no. 3, pp 255-270, April 2022. doi:10.1515/ipp-2022-0015
- [3] E. Zurnacı and H. K. Özdemir, "Investigation of the compressive strength, energy absorption properties and deformation modes of the reinforced core cell produced by the FDM method," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 1-11, April 2023. doi:10.30855/gmbd.0705047
- [4] M. Mehrpouya, A. Dehghanghadikolaei, B. Fotovvati, A. Vosooghnia, S. S. Emamian, and A. Gisario, "The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: A review," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, p. 3865, September 2019. doi:10.3390/app9183865
- [5] D. Erol, B. Doğan and M. Bozdemir, "The experimental study on examination of the usability of three dimensional printing technologies in tread pattern design of vehicle tires," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 62-69, April 2020. doi:10.30855/gmbd.2020.01.06
- [6] D. Rahmatabadi, I. Ghasemi, M. Baniassadi, K. Abrinia, and M. Baghani, "3D printing of PLA-TPU with different component ratios: Fracture toughness, mechanical properties and morphology," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 21, pp. 3970-3981, 2022. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.11.024
- [7] J.W. Stansbury and M. J. Idacavage, "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities," *Dental Materials*, vol. 32, no. 1, pp. 54-64, January 2016. doi: 10.1016/j.dental.2015.09.018
- [8] Ü. G. Başçı, and R. Yamanoğlu, "New generation production technology: additive manufacturing via FDM," *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 5, no. 2, pp. 339-352, August 2021. doi:10.46519/ij3dptdi.838281
- [9] B. Kaygusuz, and S. Özerinç, "Investigation of mechanical properties of PLA-based structures produced by 3D printer," *Machine Design and Manufacturing Magazine*, vol. 16, no. 1, pp. 1-6, May 2019.
- [10] T. Tabi, I. E. Sajo, F. Szabo, A. S. Luyt, and J. G. Kovacs, "Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing," *Express Polymer Letters*, vol. 4, no.10, pp. 659-668, October 2010. doi:10.3144/expresspolymlett.2010.80
- [11] M. Murariu and P. Dubois, "PLA composites: From production to properties," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 17-46, December 2016. doi: 10.1016/j.addr.2016.04.003
- [12] Wu, N. and Zhang, H., "Mechanical properties and phase morphology of super-tough PLA/PBAT/EMA-GMA multicomponent blends," *Materials Letters*, vol. 192, pp. 17-20, April 2017. doi: 10.1016/j.matlet.2017.01.063
- [13] A. Pandzic and D. Hodzic, "Mechanical properties comparison of PLA, tough PLA and PC 3D printed materials with infill structure - Influence of infill pattern on tensile mechanical properties," *The International Conference on Development and Modernization of Manufacturing (RIM), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Sarajevo, vol. 1208, pp. 1-13, December 2021. doi:10.1088/1757-899X/1208/1/012019
- [14] N. Naveed, "Investigating the material properties and microstructural changes of fused filament fabricated PLA and Tough-PLA parts," *Polymers*, vol. 13, no. 9, pp.1487, May 2021. doi:10.3390/polym13091487
- [15] Ultimaker 2022, "Ultimaker tough PLA TDS," *makerbot.com*, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://support.makerbot.com/s/article/1667411002379>. [Accessed: Feb. 17, 2023].
- [16] S. S. Karabeyoğlu, O. Ekşi, and K. Feratoğlu "Wear characteristics of PLA-Cu composites manufactured by fused deposition modelling under different temperature conditions," *Journal of Balikesir University Institute of Science and Technology*, vol. 23,

no.1, pp 358-365, January 2021. doi:10.25092/baunfbed.854829

- [17] I. Istif, "Identification of dry sliding wear behaviour of PLA parts manufactured by fused deposition modelling," *Dicle University Journal of Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 275-283, March 2021. doi:10.24012/dumf.855768
- [18] S. Yilmaz, "Comparative investigation of mechanical, tribological and thermo-mechanical properties of commonly used 3D printing materials," *European Journal of Science and Technology*, no. 32, pp. 827-831, 2021. doi:10.31590/ejosat.1040085
- [19] A. Sevil, A. Ondört, S. Ürgün, and S. Fidan, "Powder coating of 3D printed parts surfaces and erosive wear behaviour characterization of coatings," *European Journal of Science and Technology*, vol. 17, pp. 1106-1115, December 2019. doi:10.31590/ejosat.652512
- [20] C. Rajesh, N.K. Venkata, and G. Gowthami, "Evaluation of wear behaviour OFPLA & ABS parts fabricated by operate FDM technique with distinct orientations," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 7, no. 5S3, February 2019.
- [21] M.A. Cuiffo, J. Snyder, A.M. Elliott, N. Romero, S. Kannan and G.P. Halada, "Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and Structure," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 6, pp. 579, June 2017. doi:10.3390/app7060579
- [22] J.B. Soares, J. Finamor, F.P. Silva, L. Roldo and L.H. Cândido, "Analysis of the influence of polylactic acid (PLA) colour on FDM 3D printing temperature and part finishing," *Rapid Prototyping*, vol. 24, no. 8, pp. 1305-1316(12), January 2018. doi:10.1108/RPJ-09-2017-0177
- [23] P. K. Gurralla, and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141-149, May 2014. doi: 10.1080/17452759.2014.913400
- [24] S. Singh, S. Ramakrishna and R. Singh, "Material issues in additive manufacturing: a review," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 185-200, January 2017. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006
- [25] K.R. Samit, B. Amritanshu, K.B. Bidyut, P. Debapriya and D. Barnali, 2 - *Tribological analysis-general test standards*, Editor(s): Soney C. George, Jozef T. Haponiuk, Sabu Thomas, Rakesh Reghunath, Sarath P. S., In Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering, Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites, Elsevier, 2023, pp. 17-50, doi:10.1016/B978-0-323-90748-4.00001-7.
- [26] D.C. Wijnbergen, M.V.D. Stelt and L.M. Verhamme, "The effect of annealing on deformation and mechanical strength of tough PLA and its application in 3D printed prosthetic sockets," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 27 no. 11, pp. 81-89. August 2021. doi:10.1108/RPJ-04-2021-0090
- [27] T. Letcher and M. Waytashek, "Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer," in *ASME 2014, International Mechanical Engineering Congress and Exposition; American Society of Mechanical Engineers: Montreal, vol. 2, December 2014*. doi:10.1115/IMECE2014-39379
- [28] A. Fouly, A.K. Assaifan, I.A. Alnaser, O.A. Hussein and H.S. Abdo, "Evaluating the mechanical and tribological properties of 3D printed polylactic-acid (PLA) green-composite for artificial implant: Hip joint case study," *Polymers*, vol. 14, no. 23, December 2022. doi:10.3390/polym14235299
- [29] M. H. Muammel and Z. László, "Comprehending the role of process parameters and filament color on the structure and tribological performance of 3D printed PLA," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 647-660, November-December 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.061
- [30] N. Wu and H. Zhang, "Mechanical properties and phase morphology of super-tough PLA/PBAT/EMA-GMA multicomponent blends," *Materials Letters*, vol. 192, pp. 17-20, April 2017. doi: 10.1016/j.matlet.2017.01.063
- [31] S. Perepelkina, P. Kovalenko, R. Pechenko and K. Makhmudova, "Investigation of friction coefficient of various polymers used in rapid prototyping technologies with different settings of 3D printing," *Tribology in Industry*, vol. 39, no. 4, pp. 519-526, December 2017. doi:10.24874/ti.2017.39.04.11
- [32] H. Karakoç, İ. Ovalı, S. Dünder and R. Çitak, "Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B4C hybrid composites produced with powder metallurgy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 5348-5361, November-December 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.002
- [33] N.W. Khun, H. Zhang, L.H. Lim, C.Y. Yue, X. Hu and J. Yang, "Tribological properties of short carbon fibers reinforced epoxy composites," *Friction*, vol. 2, no. 3, pp. 226-239, September 2014. doi:10.1007/s40544-014-0043-5
- [34] L. Chang, Z. Zhang, H. Zhang and K. Friedrich, "Effect of nanoparticles on the tribological behaviour of short carbon fibre reinforced poly (etherimide) composites," *Tribology International*, vol. 38, no. 11-12, pp. 966-973, November 2005-December 2006. doi: 10.1016/j.triboint.2005.07.026
- [35] K. Hashima, S. Nishitsuji and T. Inoue, "Structure-properties of super-tough PLA alloy with excellent heat resistance," *Polymer*, vol. 51, no. 17, pp. 3934-3939, August 2010. doi: 10.1016/j.polymer.2010.06.045.
- [36] R. Muntean, S. Ambruş, N.-A. Sirbu and I. D. Uşu, "Tribological properties of different 3D printed PLA filaments," *In Nano Hybrids and Composites*, vol. 36, pp. 103-111, June 2022. doi: 10.4028/p-8k2v92

[37] S.Z. Hervan. A. Altinkaynak and Z. Parlar, "Hardness, friction and wear characteristics of 3D-printed PLA polymer," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol.235, no. 8, pp. 1590-1598, October 2020. doi:10.1177/1350650120966407

[38] K. Dass, S.R. Chauhan and B. Gaur, "Study on the effects of nano-aluminum-oxide particulates on mechanical and tribological characteristics of chopped carbon fiber reinforced epoxy composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 231, no. 4, pp.403-422, 2017. doi:10.1177/1464420715598798

[39] A.K. Sood, R.K. Ohdar and S.S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 287-295, January 2010. doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.016

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Mobility in MANET on the Performance of AODV, DSR and DSDV Protocols

Abdullah Orman^a, Hamza Aytaç Doğanay^b, Murat Dener^c

Submitted: 22.08.2022 Revised: 24.06.2023 Accepted: 06.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705066

ABSTRACT

Keywords: AODV, DSDV, DSR, NS2, Reactive and proactive routing protocols

^a Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Computer Technologies, Vocational School of Technical Sciences, 06010 – Ankara, Turkey
Orcid: 0000-0002-3495-1897

^b Gazi University, Information Security Engineering, Institute of Science and Technology, 06500 – Ankara, Turkey
Orcid: 0000-0003-4816-4373

^c Gazi University, Information Security Engineering, Institute of Science and Technology, 06500 – Ankara, Turkey
Orcid: 0000-0001-5746-6141

*Corresponding author:
aorman@aybu.edu.tr

Between MANET nodes as between Wireless Sensor Networks (WSN) nodes, route information is needed for the data packets sent by the sensor nodes to reach the target node. Route information is provided using proactive and reactive routing protocols, considering performance criteria such as efficiency, delay, packet transmission rate, packet drop rate and energy. In proactive routing protocols, route information is created on a table-based basis, while in reactive routing protocols, route information is created on a request basis. Change in speed as a mobility factor affects the performance of routing protocols positively or negatively. In this study, an experiment was carried out in the NS2 simulation environment on how AODV and DSR reactive routing protocols and DSDV proactive routing protocol perform at different selected speeds in efficiency, delay, packet transmission rate and packet drop rate metrics, and it is aimed to determine which one is the best performer. It is seen that the speed unit with the highest performance of the AODV protocol is 10 m/s (36 km/s), while the speed unit with the most performance of the DSDV and DSR protocols is 5 m/s (18 km/s). In addition, speed points between the selected speeds are also important in MANET. Due to this importance, performance measurements at 6, 7, 8 and 9 m/sec speeds are also presented with the same simulation parameters to be used future works, although they are not included in the comparison in the current study.

MANET’lerde Hareketliliğin AODV, DSR ve DSDV Protokollerinin Performansına Etkisi

ÖZ

Kablosuz Sensör Ağlardaki (KSA) sensör düğümlerinde olduğu gibi MANET düğümlerinde de gönderdikleri veri paketlerinin hedef düğüme ulaşabilmesi için rota bilgisine ihtiyaç duyulur. Rota bilgisi verimlilik, gecikme, paket iletim oranı, paket düşme oranı ve enerji gibi performans kriterleri göz önünde bulundurularak proaktif ve reaktif yönlendirme protokolleri kullanılarak sağlanır. Proaktif yönlendirme protokollerinde rota bilgisi tablo tabanlı olarak oluşturulurken reaktif yönlendirme protokollerinde rota bilgisi istek tabanlı olarak oluşturulur. Hareketlilik unsuru olarak hızın değişmesi, yönlendirme protokollerinin performansını olumlu veya olumsuz şekilde etkiler. Bu çalışmada AODV ve DSR reaktif yönlendirme protokolleri ve DSDV proaktif yönlendirme protokolünün verimlilik, gecikme, paket iletim oranı ve paket düşme oranı metriklerinde seçilen farklı hızlarda nasıl performans gösterdiklerine ilişkin NS2 simülasyon ortamında çalışma gerçekleştirilmiş ve en iyi performans gösterenin hangisi olduğunun tespiti amaçlanmıştır. AODV protokolünün en performanslı olduğu hız biriminin 10 m/sn (36 km/s) olduğu, DSDV ve DSR protokollerinin ise en performanslı olduğu hız biriminin 5 m/sn (18 km/s) olduğu görülmektedir. Bunun yanında seçilen hızların ara hızları da MANET’te önemlidir. Bu öneme istinaden mevcut çalışmada karşılaştırmaya dahil edilmemekle birlikte ilerleyen çalışmalarda kullanılmak üzere aynı simülasyon parametreleri ile 6, 7, 8 ve 9 m/sn hızlardaki performans ölçümleri de sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: AODV, DSDV, DSR, NS2, Reaktif ve proaktif yönlendirme protokolleri

1. Giriş (Introduction)

Kablosuz sensör ağlar (KSA) sensör düğüm adı verilen cihazların oluşturduğu ağlardır. KSA savunma endüstrisi, sağlık servisleri, akıllı şehirler, tarım, su altı yaşamının takip edilmesi, hava kirliliğinin tespit edilmesi gibi alanlarda ortamdaki ses, ışık, koku, kimyasal değişim ve sıcaklık gibi etmenleri sensör düğümler üzerindeki uygun alıcılar sayesinde tespit ederek dijital veriye çevirirler ve önemli verilerin elde edilmesinde kullanılırlar. Sensör düğümlerde, küçük yapıları ve taşıdıkları hassas veriler göz önüne alındığında yeteri kadar uzun çalışabilmeleri ve ilettikleri ya da depoladıkları verinin güvenliğini sağlayabilmeleri adına enerji tasarrufu ve verinin güvenliği ve bütünlüğü ön planda tutulmaktadır. Literatürde özellikle enerji tüketimine ilişkin olarak algılama, veri işleme ve iletişim olmak üzere üç işlevsel alanda büyük ölçüde katkıda bulunulmuştur [1]. Bununla birlikte sensör düğümlerin kullanıldıkları alandaki elektromanyetik frekanslar, algılama sensörlerinin kapasiteleri, haberleşme mesafeleri ve fiziksel olarak ele geçirilmeye müsait olmaları sensör düğümlerin başlıca kısıtları arasındadır.

KSA'da iletişim fiziksel, veri bağı, ağ, taşıma ve uygulama katmanları üzerinde gerçekleştirilir. Bu uygulama katmanlarına güç yönetim, hareketlilik yönetim ve görev yönetim modülleri destek olur. Bu çalışma mekanizması dahilinde sensör düğümler birbirleriyle ve baz istasyonu ile haberleşmek için yönlendirmeye ihtiyaç duyarlar. Veri güvenliğinin sağlanması, enerji tasarrufunun sağlanması, servis kalitesi, güvenilirliğin sağlanması, gecikmenin azaltılması ve verimli çalışma gereksinimleri için sensör düğümlerin gönderdikleri ve aldıkları verinin nereye gideceği, hangi sensör düğümler üzerinden geçeceği, kaç sensör düğüm geçeceği bilgilerini içeren rota bilgilerine ihtiyaç duyulur. Bu kısıtlamaları çözmek ve ihtiyaçları karşılamak için literatürde çok sayıda yönlendirme protokolü geliştirilmiş ve verinin izleyeceği en uygun rotayı tanımlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [2]. Özetle yönlendirme protokolleri rotanın keşfi ve oluşturulması görevlerini yerini getirirler.

Mobil AdHoc Ağlarda (MANET) ise KSA'lara göre düğüm sayıları daha azdır ve hareketlilik daha fazladır. Yönlendirme protokollerinin MANET'lerde de etkileri önemlidir. Bununla birlikte çalışmada düğüm hızları ve hareketliliği önemli bir nokta olduğu için hareketliliğin daha fazla olduğu MANET düğümleri ile çalışma gerçekleştirilmiştir.

MANET'lerde kullanılan yönlendirme protokolleri, karakteristikleri ve işleyişlerine göre reaktif, proaktif ve hibrid olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir [3]. Kullanılan proaktif ve reaktif yönlendirme protokollerine örnek olarak Adhoc On-demand Distance Vector (AODV), Dynamic Source Routing (DSR), Optimized Link State Routing (OLSR) ve Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) isimli yönlendirme protokolleri sayılabilir.

1.1. Reaktif Yönlendirme Protokolleri (Reactive Routing Protocols)

Reaktif yönlendirme protokolünde rota yolları, yalnızca ağ ortamındaki bir düğümden başka bir düğüme paketleri iletmek için bir ihtiyaç olduğunda kurulur [4]. Rota ihtiyacı olduğu durumlarda yönlendirme protokolü devreye girdiği için bu protokol istek güdümlü yönlendirme protokolü olarak bilinmektedir. Reaktif yönlendirme protokolünde rotanın tespit edilmesi sürecinde bir kaynak düğüm rotasını bilmediği hedef düğüme ulaşması için bir Rota İsteği (RREQ) oluşturur ve gönderir. RREQ paketi, kaynağın IP adresini, hedefin IP adresini, kaynak ve hedef sıra numarasını, isteğe ilişkin kimliği ve hop (atlama) sayısını barındırır. Hedef düğüm, önceki RREQ paketlerindeki aynı kaynak adrese ve istek kimliği alanlarına sahip bir rota isteği alırsa, paketi reddeder. Yönlendirme tablosunda bu adres mevcutsa, tablodaki hedef sıra numarası, yönlendirme tablosundaki hedef ile karşılaştırılır ve hedefe bu yoldan ulaşamazsa, hedef sıra numarasını artırarak bir rota talebi gönderir. Hedef sıra numarası böylece rota tazeliğini sağlamış olur. Rota takibinde aktif bir rotada bağlantı kopması olduğunda ve düğümler tarafından tespit edildiğinde hedef düğüm kaynak düğüme bir Rota Hatası (RERR) mesajı göndererek bu bağlantı kopmasını bildirir. Kaynak düğüm devam eden bir veri gönderimi sürecinde ise rota tespit işlemini yeniden başlatır.

AODV ve DSR isimli yönlendirme protokolleri reaktif yönlendirme protokolü kapsamındadır [5].

1.2. Proaktif Yönlendirme Protokolleri (Proactive Routing Protocols)

Proaktif protokol kullanılan MANET'te bir düğüm, ağdaki tüm hedeflere giden rotaları sürekli olarak

korur, böylece protokolü rastgele ve düzensiz trafik hareketine uygun hale getirir. Rotaların korunması bu protokolün tablo tabanlı rota tutmasından kaynaklanır. Bu tabloların oluşturulması her düğümün yakın komşularını sık sık sorgulayarak güncel bir rota tablo oluşturulması şeklinde cereyan eder. Bu nedenle tablo güdümlü olarak tanımlanan [6] proaktif yönlendirme protokolü, kaynak ve hedef düğümlerin zaman içinde değiştiği trafik üreten, alt kümeleri bulunan büyük ve yoğun ağlar için önerilmektedir.

OSLR ve DSDV isimli yönlendirme protokolleri proaktif yönlendirme protokolü kapsamındadır [7].

KSA'da olduğu gibi MANET düğüm hareketliliği ve hızları enerji, verimlilik, servis kalitesi, paket iletim oranları, gecikme oranları ve ağ tutarlılığı açısından önemlidir. Literatürdeki birçok çalışmada [8],[9], [10] bu metrikler KSA üzerindeki model ve deneylere dahil edilmektedir. Aynı metrikler bu çalışmada kullanılan MANET simülasyonunda baz alınmıştır. Proaktif yönlendirme protokolü olan DSDV ve reaktif yönlendirme protokolleri olan DSR ve AODV yönlendirme protokollerinin, MANET düğümleri sabit haldeyken ve farklı sabit hızlardayken ortaya koydukları performansları Verimlilik, Paket İletim Oranı (PİO), Gecikme ve Paket Düşme Oranları (PDO) metriklerinde karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın, MANET kullanılan ortam ve sistemlerde verimlilik, gecikme, paket iletim oranı ve paket düşme oranı metriklerinde performans ihtiyacına göre düğümlerin optimal hızını belirlemek açısından literatüre ve uygulamaya katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu bağlamda devam eden bölümlerde ikinci bölümde konu ile alakalı olarak literatür taraması yapılmış ve çalışmanın literatürden farkı ortaya konmuş, üçüncü bölümde AODV, DSDV ve DSR yönlendirme protokollerinin anılan metriklerde performansları NS2 simülasyon ortamında ölçülmüş ve karşılaştırılmış, dördüncü bölümde ise çalışmanın sonuçları vurgulanmıştır.

2. İlgili Çalışmalar (Related Works)

Bozkurt İncelenen bir çalışmada [11] sıklıkla kullanılan AODV, DSR ve DSDV protokollerinin gerçek dünya, otoban ve Manhattan ızgarası şeklinde oluşturulan üç trafik ortamındaki detaylı değerlendirmeleri Araç AdHoc Ağ (VANET) odaklı olarak çalışılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarını OMNET++ ve SUMO simülasyon ortamında 50, 150, 250, 350 ve 450 düğüm ve UDP iletişimi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacıların kullandıkları trafik ortamlarında araçların değişen hızlarda hareket ettikleri varsayılmış ancak çalışma sonuçları yoğunluk metriği kıyaslanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre gerçek dünya uygulamasında DSR'in diğer iki protokolden daha iyi performans gösterdiği, otoban simülasyonunda yoğunluk düşükken DSR'in diğerlerinden daha iyi performans gösterdiği bununla birlikte yoğunluk artında AODV ve DSR'in DSDV'den daha yeterli olduğu ancak DSDV'nin daha fazla yoğunlukta verimlilik açısından oldukça iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Araştırmacılar tarafından Manhattan ızgarasında ise DSR'in genel itibari ile verimlilik açısından iyi performans gösterdiği ancak 250 yoğunluk noktasından sonra AODV'nin daha performanslı olduğu belirtilmiştir.

Bir diğer çalışmada [12] araştırmacılar sıklıkla kullandıklarını belirttikleri AODV, DSDV, DSR, DYNAMIC MANET On-demand (DYMO), Fish-eye Scope Routing (FSR) ve OLSR yönlendirme protokollerinin verimliliklerini Kablosuz Çokhoplu Ağlarda (WMN) sel stratejileri açılarından karşılaştırmışlardır. Simülasyonlar NS-2 ortamında Constant Bit Rate (CBR) trafiği, 512 byte paket boyutu rasgele yol noktası hareketlilik modeli ve 1000x1000 metre alanda gerçekleştirmişlerdir. Hareketlilik modelinde 15 ve 30 metre/saniye hızlar içeren senaryolar kullanmışlardır. DSR protokolünde yüksek hareketlilikteki yanlış rota önbelleklemelerinin (RCing) gürültülü ve hatalı rota bilgisi oluşturduğunu ve gecikmeyi artırdığını tespit etmişlerdir. Yerel Ağ Onarımının (LLR) rotanın yeniden keşfedilme şansını azalttığından dolayı AODV'yi diğer reaktif protokollere kıyasla yüksek hareketlilik hızına daha uyumlu hale getirdiğini belirtmişlerdir. DSDV'nin diğer proaktif protokollere kıyasla yüksek hareketlilikte verimliliğinin daha fazla olduğu vurgulanmıştır. Yüksek hareketlilik senaryolarında OLSR'nin düşük yakınsama oranı nedeniyle verimde kademeli bir düşüş gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

MANET'lerde muhtemel konumları komşuluk çerçevesinde hibrid bir modelle tahmin etmeye dayalı gerçekleştirdikleri çalışmalarında [13] araştırmacılar tahmini olasılıklı konumlara dayanan çoklu yollu protokol önermişler (HM-MPR) ve AODV protokolünü çeşitli açılardan değerlendirmişlerdir. Simülasyonlarını NS2 ortamında 5-20 metre/saniye hız, 100-300 arası düğüm, 1000x1000 metre alan

ve 30 dakika simülasyon süresi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. AODV protokolünde tahmini hız kullanılarak RREQ ve RREP yönlendirmesine karar verilmesinin çok iyi ayarlandığı ve Bayesian hız tahmini kullanılarak AODV'de paket teslim oranı %46 oranında iyileştirildiğini belirtmişlerdir. Sundukları modelin değişken hareketlilikte farklı hızlarda çeşitli metriklerde performans değerlendirmelerini yapmışlar ve başka bir çalışma ile sadece daha iyi performans gösterdiği yönünden karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada detaylandırmadıkları simülasyon sonuçlarına göre sundukları modelin 5 m/s hızda % 93, 10 m/sn hızda %87, 15 m/sn hızda % 81 ve 20 m/sn hızda % 85 paket gecikme oranına sahip olduğu, 5 m/sn hızda 21 ms, 10 m/sn hızda 24 ms, 15 m/sn hızda 27 ms ve 20 m/sn hızda 29 ms gecikme görüldüğü vurgulanmıştır.

İncelenen bir diğer çalışmada [14] araştırmacı hareketliliğin yüksek olduğunu belirttiği Uçan AdHoca Ağlarda (FANET) link kurulumundaki sorunları azaltan hibrit bir optimizasyon modeli olarak dinamik ve statik ortamlara uygun bir yönlendirme stratejisi önermiştir. Modelini NS2 simülasyon ortamında, OLSR ve DSR protokolleri kullanarak, 1000x1000 metre alanda, 15 düğüm ile, 512 byte paket boyutu ve CBR trafik modeli kullanarak, 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 m/sn düğüm hızları belirleyerek gerçekleştirmiş ve sonuçları AODV ve DSDV protokolleri ile karşılaştırmıştır. Araştırmacı ortaya koyduğu hibrit modelin AODV ve DSDV protokollerine oranla daha çok performans gösterdiğini belirtmekle beraber bu çalışma açısından simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde sabit düğüm kullanmadığı, kendi modeli, AODV ve DSDV protokollerinin en yüksek verimliliği 5 m/sn hızda gösterdiği, en yüksek paket iletim oranının yine 5 m/sn hızda gerçekleştiği ve gecikmenin en düşük 5 m/sn hızda olduğu gözlemlenmiştir. Bu özellik incelenen çalışmada vurgulanmamakla beraber kendi çalışmamızda değerlendirilmek üzere incelenmiştir.

Bağ hatası zamanının tahmini üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada [15] araştırmacılar modellerini (LSQPR-LFE) NS 2.35 simülasyon ortamında 1000 saniye simülasyon süresi, 2000x2000 metre alan, 4, 8, 12, 16 ve 20 m/sn hız, 512 byte paket boyutu, CBR trafik modeli ve AODV protokolü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar sabit düğüm kullanmamakla birlikte bağ hata sayısının hareketlilik arttıkça arttığını ve bu sayının en düşük olduğu hızın 4 m/sn olduğunu simülasyon sonuçlarında göstermişlerdir.

İncelenen bir diğer çalışmada [16] araştırmacılar VANET'lerde blackhole saldırısına karşı AODV protokolünün direncinin artırılması için bir model önermişlerdir. Düğümlerin yüksek hareketliliği nedeniyle, VANET'te verimli veri iletiminin yürütülmesi için uygun iletişim protokolüne ihtiyaç olduğu belirtilmiştir. Simülasyonlarında belirledikleri senaryolarda 10 ve 20 düğüm için 20, 40, 60 ve 90 kilometre / saat hızları belirlemişlerdir. Hız bazında bir performans değerlendirmesi yapılmamış ancak senaryolara göre DSR ve AODV karşılaştırıldığında farklı zamanlarda paket düşmesi, çarpışma ve verimlilik metriklerinde birbirlerine üstünlük sağladıkları belirtilmiştir.

Çok duraklı bluetooth ağları üzerine gerçekleştirilen çok geniş kapsamlı bir çalışmada [17] yüksek düğüm hareketliliğinin, ağdaki tüm düğümleri etkilediği ve güç kaynaklarını tüketen sık rota keşif süreçleri meydana gelmesine yol açtığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca reaktif yönlendirme protokollerinin özellikle büyük ve yüksek hareketin bulunduğu ağlarda rota keşif gecikmesinin çok yüksek olma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir.

İncelenen başka bir çalışmada [18] hava omurga ağı için spiral hat (SLMM) tabanlı yeni bir hareketlilik modeli çalışmışlardır. Çalışmada insansız hava araçlarının genellikle 25 m/sn hızın altında hareket ettikleri belirtilmiş ve simülasyon çalışmalarında 10 m/sn hız kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre hava omurga ağının, SLMM altında daha yüksek verime, daha düşük uçtan uca gecikmeye ve daha düşük paket kayıp oranına sahip olduğu, bununla birlikte daha iyi bir DSR'ın bariz faydalar sağlamayacağı ve SLMM altında bir miktar yönlendirme yükü getirebileceği ve bu nedenle, AODV protokolünün SLMM altındaki hava omurga ağı için en iyi yönlendirme protokolü olacağı tespiti ortaya konmuştur.

Çalışmada [19] araştırmacılar bölge tabanlı bir yol bulma mekanizması (ZRDM) ve bir bağ hatası tahmin mekanizması (LFPM) olmak üzere iki mekanizma önererek MANET'lerde isteğe bağlı kaynak yönlendirme protokollerinin geliştirilmesini hedeflemişlerdir. 0'dan 5 m/sn hıza ve ve 5'ten 35 m/sn hıza çıkan düğümler kullandıkları simülasyonların deneysel sonuçlarının önerilen mekanizmaların DSR protokolü, güvenilir DSR, bölge tabanlı DSR ve segment tabanlı DSR gibi iyi bilinen mekanizmalardan daha iyi performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Uçtan uca gecikme oranında DSR

en iyi performansı 5 m/sn hızda, önerilen model ise 10 m/sn hızda göstermiştir. Normalleştirilmiş yönlendirme yükünde her iki modelin de 5 m/sn hızda en iyi performansı verdiği belirtilmiştir.

Araştırmacılar bir diğer çalışmada [20] ana FANET yönlendirme protokollerini hayati parametrelere dayalı olarak önemli kısıtlamaları dikkate alarak karşılaştırmışlardır. Çalışmaya göre düğüm hızları KSA'da 0-6 km/saat, VANET'lerde 20-130 km/saat, Robotik Kablosuz Mobil AdHoc Ağlarda (RANET) 0-20 km/saat, Sensör/Aküatör Ağlarda (SANET) 20-130 km/saat ve FANET'lerde 6-430 km/saat olarak belirtilmiştir. İnsansız hava araçlarının 0-100 km/saat arası değişen düğüm hızlarından dolayı iletişim problemlerinin yaşandığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca küme başı seçiminde hız bilgisinin kullanıldığı modellerin de bulunduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak DSDV, DSR ve AODV protokollerinin yapılan simülasyonda kullanılan hız kategorileri arasında en performanslı olduğu hız tespit edilmeye çalışılmıştır. Gözlemlendiği üzere literatürde üç yönlendirme protokolünün de hangi optimal hızda en yüksek performansı verdiği çalışmasına rastlanmamıştır. Çalışmanın, en yüksek performansın alındığı optimal hızın tespiti için gerçekleştirilecek olan sonraki çalışmalara temel oluşturması hedeflenmektedir.

3. Performans Analizi (Performance Analysis)

MANET'te sensör düğümlerin hareketsiz halleri (fixed) ve farklı sabit hızlardaki hareketleri esnasında AODV, DSR ve DSDV yönlendirme protokollerinin performans karşılaştırması Verimlilik, Paket İletim Oranı (PİO), Paket Düşme Oranları (PDO) ve Gecikme metrikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Performans analizi için Ubuntu işletim sistemi üzerinde çalıştırılan NS2 v2.35 simülasyon ortamı kullanılmıştır.

3.1. Simülasyon parametreleri (Simulation parameters)

Simülasyonda 20 düğüm oluşturulmuş ve düğümler arasında Constant Bit Rate uygulaması ile UDP iletişimi gerçekleştirilmiştir. Ağdaki paket boyutları 512 byte olarak belirlenmiştir. Simülasyon alanı $x=500$ ve $y=500$ olarak tanımlanmış ve her bir simülasyon olayı için 300 saniye simülasyon süresi belirlenmiştir. Her simülasyon olayı belirlenen farklı hızlarda AODV, DSR ve DSDV protokolleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düğüm hızları her bir simülasyon olayı için sırasıyla 0, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn olarak tanımlanmıştır. MAC protokolü olarak IEEE 802.11 kullanılmıştır. Sayılan simülasyon parametreleri, diğer parametreler ve düğüm ayarları ile birlikte Tablo 1 olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Simülasyon parametreleri (Simulation parameters)

#	Parametre	Değer
1	Simülasyon Ortamı	NS-2 v 2.35
2	Yönlendirme Protokolü	AODV, DSR, DSDV
3	Düğüm Sayısı	20
4	Düğüm Hızı (metre/saniye)	0 (fixed), 5, 10, 15, 20, 25
5	MAC Protokolü	IEEE 802.11
6	İletişim	CBR, UDP
7	Paket Boyutu (byte)	CBR 1000, UDP 1500
8	Simülasyon Süresi (saniye)	300
9	Alan ($x*y$)	500*500
10	Kanal	Kablosuz
11	Phy	KablosuzPhy
12	Anten	OmnAnten
13	txPower	0,09
14	rxPower	0,07
15	idlePower	0,01
16	sleepPower	0,0001
17	transitionPower	0,02
18	transitionTime	0,0005

Koordinatlar setdest komutu ile otomatik ve ön tanımlı olarak rastgele noktalara hareket edecek şekilde belirlenmiştir. Düğümler her hız bareminde aynı olacak şekilde kendilerine tanımlanmış olan aynı başlangıç koordinatından harekete başlamakta ve zaman içerisinde rastgele koordinatlara uğrayarak yine tanımlanmış kendi son koordinatları yönüne hareket etmektedir. Düğüm yönleri bu doğrultuda mob ve tcl dosyaları içerisinde tanımlanmıştır.

3.2. Performans metrikleri (Performance metrics)

Simülasyon performansı Verimlilik, Paket İletim Oranı (PİO), Paket Düşme Oranları (PDO) ve Gecikme metrikleri kullanılarak ölçülmüştür.

Verimlilik birim zamanda iletilen ortalama bit sayısı anlamına gelmektedir. Bir ağın verimliliği paketlerin kaynaktan hedef düğüme aktarılma hızıyla ölçülür. Ağda tıkanıklık olduğunda, paket kaybı ve ağ tıkanıklığı meydana gelir ve verimlilik bu durumdan olumsuz etkilenir. Çalışmadaki verimlilik Eşitlik.1'deki denklem ile Kbps cinsinden ölçülmüştür.

$$\text{Verimlilik} = \frac{\text{iletilen Byte Sayısı} \times 8}{\text{Simülasyon Süresi} \times 1000} \quad (1)$$

Paket İletim Oranı (PİO), hedef düğüme alınan toplam veri paketi sayısının, kaynak düğümden gönderilen toplam veri paketi sayısına oranıdır. PİO yüzde olarak hesaplanır. Sonuçlar bu çalışmada farklı yönlendirme protokollerinin farklı düğüm hızlarında kullanılması doğrultusunda değişiklik göstermektedir. PİO Eşitlik.2'deki denklem ile ölçülmüştür.

$$PİO = \frac{\text{Alınan Paket Sayısı}}{\text{Gönderilen Paket Sayısı} \times 100} \quad (2)$$

Paket Düşme Oranları (PDO) düşen toplam veri paketi sayısının, kaynak düğümden gönderilen toplam veri düğümü sayısına oranıdır. Sonuçlar bu çalışmada farklı yönlendirme protokollerinin farklı düğüm hızlarında kullanılması doğrultusunda değişiklik göstermektedir. PDO Eşitlik.3'deki denklem ile ölçülmüştür.

$$PDO = \frac{\text{Gönderilen Paket Sayısı} - \text{Alınan Paket Sayısı}}{\text{Gönderilen Paket Sayısı} \times 100} \quad (3)$$

Gecikme, paketin kaynak düğümden hedef düğüme ulaşması için geçen süredir. Toplam gecikme süresinin alınan paket süresine oranı olarak saniye cinsinden Eşitlik.4'teki şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Gecikme} = \frac{\text{Gecikme Süreleri Toplamı}}{\text{Alınan Paket Sayısı}} \quad (4)$$

3.3. Simülasyon senaryosu (Simulation scenario)

Simülasyon senaryoları AODV, DSDV ve DSR yönlendirme protokollerinin ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan MANET'teki düğüm hızları temelli olarak oluşturulmuştur. Senaryolar değişen her bir hız ve yönlendirme protokolü için ayrı ayrı uygulanmış ve uygulanan her simülasyon bir simülasyon olayı olarak değerlendirilmiştir.

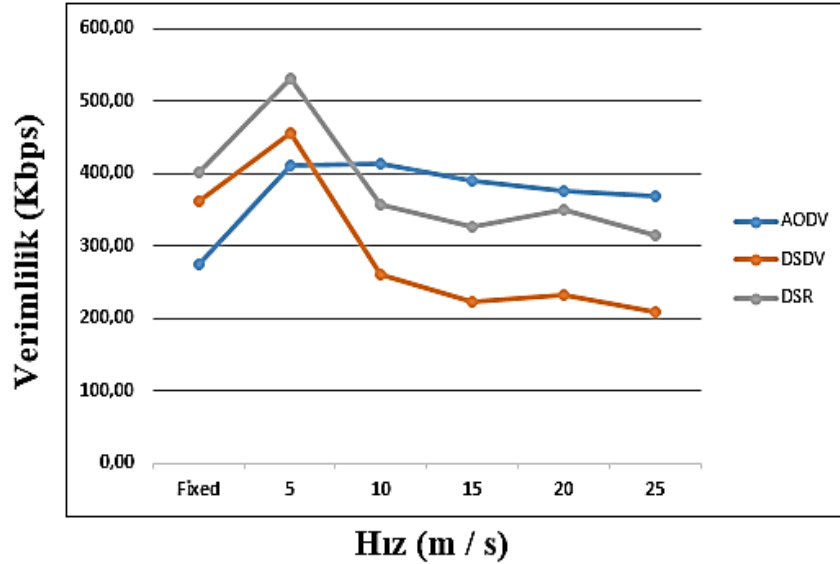
Her bir simülasyon olayında oluşturulan 20 düğüm için NS2 simülasyon ortamının setdest özelliği kullanılarak simülasyon süresi boyunca uygulanacak hareketlilik modeli ve hızlar belirlenmiştir. Çalışmada tüm düğümlerin aynı koordinatlardan hareketlerine başlamaları amacıyla tüm grup başlangıç koordinatları önceden tanımlanmış olmakla birlikte bir sonraki hareket koordinatı ve yönleri setdest komutu ile rasgele olarak oluşturulmuştur. Bu açıdan çalışmada Random Waypoint Mobility Model kullanılmıştır. Setdest komutu ile sırasıyla düğüm sayısı (n), hız türü (s), minimum hız (m), maksimum hız (M), simülasyon süresi (t), duraklatma çeşidi (P), duraklatma zamanı (p), x eksen (x) ve y eksen (y) parametreleri kullanılarak mob dosyası üretilmiş ve simülasyon başlangıç dosyasına (TCL) tanımlanmıştır. Bu yöntemle her simülasyon olayında düğümlerin aynı noktadan harekete başlaması ya da belirlenen konumda sabit kalmaları ve rasgele belirlenmiş rotayı takip etmeleri sağlanmıştır. Böylelikle rasgele değişken başlangıç koordinatının performans metriklerinde oluşturacağı farklılıklar önlenmiştir.

Bu simülasyon senaryosu doğrultusunda toplamda 18 simülasyon olayı değerlendirilmek üzere oluşturulmuştur.

3.4. Simülasyon sonuçları (Simulation results)

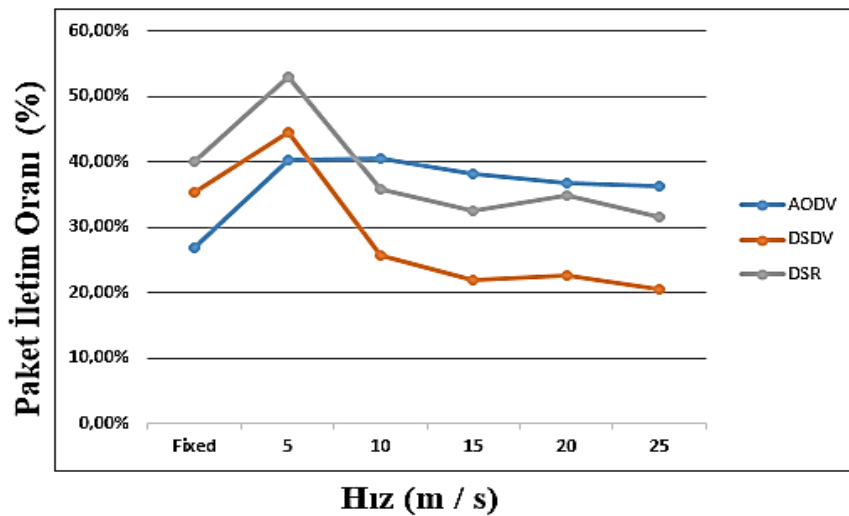
Verimlilik metriğinde hareketsiz halde, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn hızlarında olmak üzere AODV protokolü sırasıyla 273,71, 411,04, 412,95, 389,50, 374,43 ve 369,16 Kbps, DSR protokolü sırasıyla

401,18, 530,72, 357,11, 325,59, 349,50 ve 315,43 Kbps, DSDV protokolü ise sırasıyla 361,24, 454,99, 261,02, 222,72, 231,73 ve 209,29 Kbps performansı göstermiştir. Şekil 1'de gösterilen verimlilik performansı karşılaştırmasına göre AODV protokolü, düğümler sabit haldeyken en düşük verimlilik performansına sahip olmasına rağmen hızın 10 m/sn ve üzerine çıkmasıyla diğer iki protokolden daha çok verimlilik ürettiği, bununla birlikte verimliliğin her üç protokol için de en yüksek olduğu hızın 5 m/sn olduğu, kendisinden önceki düşük hıza göre performansın oransal olarak en çok 5 m/sn hızda arttığı görülmektedir.



Şekil 1. AODV, DSDV ve DSR protokollerinin verimlilik performansları (Efficiency Performances of AODV, DSDV and DSR Protocols)

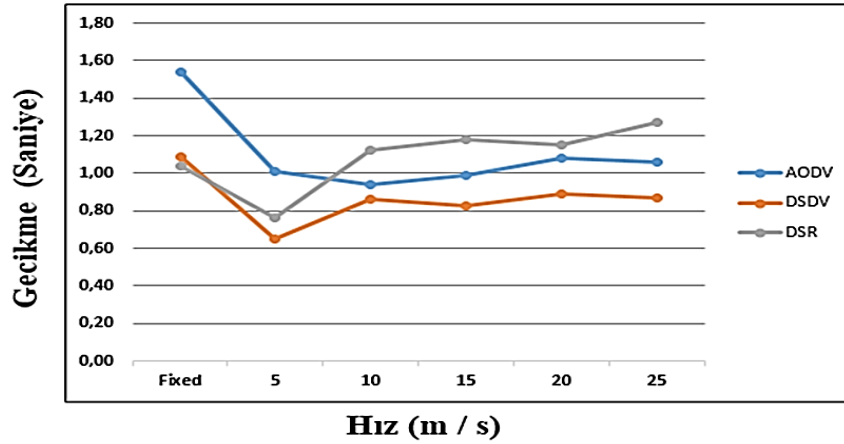
PİO metriğinde hareketsiz halde, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn hızlarında olmak üzere AODV protokolü sırasıyla 26,83%, 40,30%, 40,48%, 38,18%, 36,71% ve 36,19%, DSR protokolü sırasıyla 40,12%, 53,07%, 35,71%, 32,56%, 34,95% ve 31,54%, DSDV protokolü ise sırasıyla 35,41%, 44,61%, 25,59%, 21,83%, 22,72% ve 20,52% paket iletim performansı göstermiştir. Şekil 2'de gösterilen verimlilik performansı karşılaştırmasına göre AODV protokolü, düğümler sabit haldeyken en düşük PİO performansına sahip olduğu halde hızın 10 m/sn ve üzerine çıkmasıyla diğer iki protokolden daha çok PİO performansı gösterdiği, bununla birlikte en yüksek PİO'nun DSR ve DSDV protokolleri için 5 m/sn hızda, AODV protokolü için 10 m/sn hızda olduğu görülmektedir. AODV protokolünde 5 m/sn hızda üretilen PİO 10 m/sn hızda üretilen PİO ile çok yakın değerlere sahiptir ve 0,12% azdır. PİO'nun, AODV protokolü için kendisinden önceki düşük hıza göre performansın oransal olarak DSDV ve DSR protokollerindeki gibi en çok 5 m/sn hızda arttığı görülmektedir.



Şekil 2. AODV, DSDV ve DSR Protokollerinin PİO Performansları (PIO Performances of AODV, DSDV and DSR Protocols)

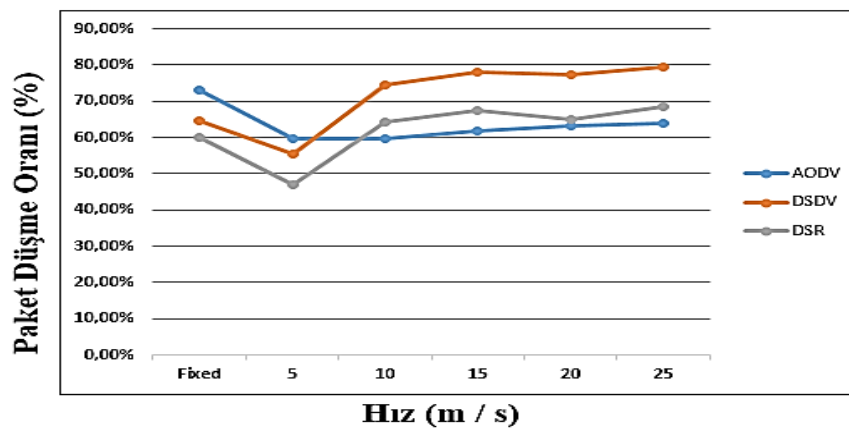
Gecikme metriğinde hareketsiz halde, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn hızlarında olmak üzere ortalama olarak

AODV protokolü sırasıyla 1,54, 1,01, 0,94, 0,99, 1,08 ve 1,06 saniye, DSR protokolü sırasıyla 1,04, 0,76, 1,12, 1,18, 1,15 ve 1,27 saniye, DSDV protokolü ise sırasıyla 1,09, 0,65, 0,86, 0,83, 0,89 ve 0,87 saniye gecikme performansı göstermiştir. Şekil 3'te gösterilen ortalama gecikme performansı karşılaştırmasına göre AODV protokolü, düğümler sabit haldeyken en yüksek gecikme süresiyle en düşük gecikme performansına sahip olduğu halde hızın 10 m/sn ve üzerine çıkmasıyla DSR'dan daha çok performans gösterdiği, bununla birlikte en düşük gecikmenin DSR ve DSDV protokolleri için 5 m/sn hızda, AODV protokolü için 10 m/sn hızda olduğu görülmektedir. AODV protokolünde 5 m/sn hızda üretilen gecikme 10 m/sn hızda üretilen gecikme ile çok yakın değerlere sahiptir ve 0,07 saniye fazladır. Gecikmenin, AODV protokolü için kendisinden önceki düşük hıza göre performansın oransal olarak DSDV ve DSR protokollerindeki gibi en çok 5 m/sn hızda azaldığı görülmektedir.



Şekil 3. AODV, DSDV ve DSR Protokollerinin Gecikme Performansları (Latency Performance of AODV, DSDV and DSR Protocols)

PDO metriğinde hareketsiz halde, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn hızlarında olmak üzere ortalama olarak AODV protokolü sırasıyla 73,17%, 59,70%, 59,52%, 61,82%, 63,29% ve 63,81%, DSR protokolü sırasıyla 59,88%, 46,93%, 64,29%, 67,44%, 65,05% ve 68,46%, DSDV protokolü sırasıyla 64,59%, 55,39%, 74,41%, 78,17%, 77,28% ve 79,48% paket düşme oranı performansı göstermiştir. Şekil 4'te gösterilen PDO performansını karşılaştırmasına göre AODV protokolü, düğümler sabit haldeyken en yüksek paket düşüm oranına sahip olmasıyla en düşük PDO'na sahip olduğu halde hızın 10 m/sn ve üzerine çıkmasıyla DSR ve DSDV'den daha çok performans gösterdiği, bununla birlikte en düşük paket düşme oranının DSR ve DSDV protokolleri için 5 m/sn hızda, AODV protokolü için 10 m/sn hızda olduğu görülmektedir. AODV protokolünde 5 m/sn hızda üretilen PDO 10 m/sn hızda üretilen PDO ile çok yakın değerlere sahiptir ve 0,18% daha fazladır. PDO'nun, AODV protokolü için kendisinden önceki düşük hıza göre performansın oransal olarak DSDV ve DSR protokollerindeki gibi en çok 5 m/sn hızda azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. AODV, DSDV ve DSR Protokollerinin PDO Performansları (PDO Performances of AODV, DSDV and DSR Protocols)

Çalışmamızda her ne kadar düğümlerin belirli hızlarda seçilen protokolleri kullandıkları durumda gösterdikleri performanslar karşılaştırılmış olsa da, belirlenen hızların aralarındaki hız baremlerinin de kayda alınması önemlidir. Bu önem, m/sn cinsinden hesaplanan iki hız biriminin km/s ölçüsüne çevrildiğinde aralarında oldukça fazla fark olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin 10 m/sn 36

km/s'e eşitken, 15 m/sn 54 km/s hıza eşittir. MANET ortamında düğümlerin 36 km/s ile hareket etmesi ile 54 km/s ile hareket etmesi arasında oldukça büyük farklar mevcuttur. Bununla birlikte 0, 5, 10, 15, 20 ve 25 m/sn hızlarının çalışmada kullanıldığı düşünüldüğünde çok fazla sayıdaki ara hızlardaki (1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13... m/sn. gibi) performansların hesaplanmasının ayrı bir çalışma konusu olması gerektiği değerlendirilmiştir. İlerleyen çalışmalara temel olması amacıyla çalışmadaki simülasyon ortamı ve parametreleri kullanılarak AODV, DSDV ve DSR yönlendirme protokollerinin 6, 7, 8 ve 9 m/sn hızlardaki PİO, Gecikme, Verimlilik ve PDO metriklerine ait performansları ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 2 olarak sunulmuştur. Tablo 2'deki ölçüm sonuçlarına göre en yüksek performansların PİO metriğinde 7 m/s hızda DSR protokolüne, Gecikme metriğinde 7 m/sn hızda DSDV protokolüne, Verimlilik metriğinde 7 m/sn hızda DSR protokolüne ve PDO metriğinde 7 m/sn hızda DSR protokolüne ait olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. AODV, DSDV ve DSR Protokollerinin 6,7,8 ve 9 m/sn hızlardaki performansları (Performance of AODV, DSDV and DSR Protocols at speeds of 6,7,8 and 9 m/s)

PROTOKOL	METRİKLER	HIZLARA GÖRE PERFORMANSLAR			
		6 m/sn	7 m/sn	8 m/sn	9 m/sn
AODV	PİO	48.37%	63.53%	52.53%	50.30%
	GECİKME	0.90 Saniye	0.62 Saniye	0.76 Saniye	0.78 Saniye
	VERİMLİLİK	493.37 Kbps	648.00 Kbps	535.77 Kbps	513.03 Kbps
	PDO	51.63%	36.47%	47.47%	49.70%
DSDV	PİO	44.55%	60.85%	43.39%	42.39%
	GECİKME	0.63 Saniye	0.58 Saniye	0.62 Saniye	0.67 Saniye
	VERİMLİLİK	454.42 Kbps	620.70 Kbps	442.60 Kbps	432.44 Kbps
	PDO	55.45%	39.15%	56.61%	57.61%
DSR	PİO	52.84%	66.66%	54.57%	49.73%
	GECİKME	0.74 Saniye	0.63 Saniye	0.75 Saniye	0.81 Saniye
	VERİMLİLİK	528.43 Kbps	666.67 Kbps	545.72 Kbps	497.27 Kbps
	PDO	47.16%	33.34%	45.43%	50.27%

4. Sonuç (Conclusion)

Tablo 3. AODV, DSR ve DSDV Protokollerinin seçilen hızlarda en iyi performansı gösterdiği hızlar (AODV, DSR and DSDV Protocols have the best performance at the chosen speeds)

Protokol	Metrik	Hız (metre / saniye)					
		0 (fixed)	5	10	15	20	25
AODV	Verimlilik			✓			
	PİO			✓			
	Gecikme			✓			
	PDO			✓			
DSR	Verimlilik		✓				
	PİO		✓				
	Gecikme		✓				
	PDO		✓				
DSDV	Verimlilik		✓				
	PİO		✓				
	Gecikme		✓				
	PDO		✓				

Performans sonuçlarını içeren Tablo 3 incelendiğinde, aynı başlangıç konumuna sahip, rasgele belirlenmiş rotayı takip eden, aynı iletişim ve karakteristik özelliklerine sahip 20 düğüm üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre AODV, DSR ve DSDV protokollerinin performanslarına hareketlilik unsuru olarak hızın doğrudan etkisi olduğu görülmektedir.

Hız arttıkça verimlilikte AODV protokolünün DSDV ve DSR protokolüne üstün geldiği, AODV

protokolünün performansı artarken diğerlerinin performanslarının hareketsiz konumdaki performanslarına oranla düştüğü gözlemlenmiştir. Yine hız arttıkça AODV protokolünün düğümlerin hareketsiz hallerine göre PİO'nda performans artışı gösterdiği, DSR ve DSDV'nin performansları düşmektedir. Gecikme metriğinde DSR'da hız arttıkça performans düşmüş, AODV ve DSDV sabit düğüm durumuna göre performans artışı göstermiştir. PDO metriğinde hız artışı durumunda en iyi performansı AODV protokolü göstermiş, DSR ve DSDV protokollerinde düğümlerin hareketsiz hallerine göre PDO'nda performans düşüşü yaşanmıştır.

Çalışmanın ana konusu olarak hareketliliğin hız unsurundaki değişimde AODV, DSR ve DSDV protokollerinin olumlu veya olumsuz şekillerde etkilendiği gözlemlenmekle birlikte simülasyon parametreleri ve sonuçları çerçevesinde AODV protokolünün en performanslı olduğu hız biriminin 10 m/sn (36 km/s) olduğu, DSDV ve DSR protokollerinin ise en performanslı olduğu hız biriminin 5 m/sn (18 km/s) olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda önceki bir çalışmada [20] belirtilen farklı kablosuz sensör ağ türlerinde düğümlerin sahip olabilecekleri hız baremleri doğrultusunda VANET'lerde (20-130 km/saat), RANET'lerde (0-20 km/saat), SANET'lerde (20-130 km/saat) ve FANET'lerde (6-430 km/saat) hız tercihleri arasında 5 ve 10 m/sn hızları mevcut ise 5 m/sn hız için DSDV veya DSR protokollerinin tercih edilmesi, 10 m/sn hız için ise AODV protokolünün tercih edilmesi neticesinde en yüksek performans elde edilecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] N. Mazumdar, A. Nag and S. Nandi, "HDDS: Hierarchical Data Dissemination Strategy for energy optimization in dynamic wireless sensor network under harsh environments," *Ad Hoc Networks*, vol. 111, 2021. doi:10.1016/j.adhoc
- [2] I. Daanoun, B. Abdennaceur, and A. Ballouk, "A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 114, 2021. doi:10.1016/j.adhoc.2020.102409
- [3] F. T. Al-Dhief, F. Sabri, S. Fouad, N. M. A. Latiff, and M. A. A. Albader, "A review of forest fire surveillance technologies: Mobile ad-hoc network routing protocols perspective," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 31, no. 2, pp. 135-146, 2019. doi:10.1016/j.jksuci.2017.12.005
- [4] A. Amuthan, N. Sreenath, P. Boobalan and K. Muthuraj, "Dynamic multi-stage tandem queue modeling-based congestion adaptive routing for MANET," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 3, pp. 1467-1473, 2018. doi:10.1016/j.aej.2017.03.026
- [5] D. Sarkar, S. Choudhury, and A. Majumder, "Enhanced-Ant-AODV for optimal route selection in mobile ad-hoc network," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 33, no. 10, pp. 1186-1201, 2021. doi:10.1016/j.jksuci.2018.08.013
- [6] P. Kumar, and S. Verma, "Implementation of modified OLSR protocol in AANETs for UDP and TCP environment," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 1305-1311, 2019. doi:10.1016/j.jksuci.2019.07.009
- [7] J. R. Vacca, Ed., *Computer and Information Security Handbook*, Second Edition, Burlington: Elsevier, 2013.
- [8] J. Yang, H. Xia, Y. Wang, and H. Tian, "Simulation of badminton sports injury prediction based on the internet of things and wireless Sensors, Microprocessors and Microsystem," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 81, 2021. doi:10.1016/j.micpro.2020.103676
- [9] J. Liu, H. Liu, Y. Chen, Y. Wang, and C. Wang, "Wireless Sensing for Human Activity: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1629-1645, 2020. doi:10.1109/COMST.2019.2934489
- [10] O. Deepa, and J. Suguna, "An optimized QoS-based clustering with multipath routing protocol for Wireless Sensor Networks," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 32, no. 7, SS. 763-774, 2020. doi:10.1016/j.jksuci.2017.11.007
- [11] F. M. Malik, H. A. Khattak, A. Almogren, O. Bouachir, I. Din, and A. Altameem, "Performance Evaluation of Data Dissemination Protocols for Connected Autonomous Vehicles," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 126896-126906, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.3006040
- [12] F. A. Al-Zahrani, "On Modeling Optimizations and Enhancing Routing Protocols for Wireless Multihop Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 68953-68973, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.2986010
- [13] N. S. S. Farheen, and A. Jain, "Improved routing in MANET with optimized multi path routing fine tuned with hybrid modeling," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Elsevier, 2020. doi:10.1016/j.jksuci.2020.01.001

- [14] D. J. S. Raj, "A Novel Hybrid Secure Routing for Flying Ad-hoc Networks," *Journal of Trends, Computer Science and Smart Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 155-164, 2020. doi:10.36548/jtcsst.2020.3.005
- [15] S. Patel, and H. Pathak, "A mathematical framework for link failure time estimation in MANETs," *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2021. doi:10.1016/j.jestch.2021.04.003
- [16] P. Tyagi, and D. Dembla, "Performance analysis and implementation of proposed mechanism for detection and prevention of security attacks in routing protocols of vehicular ad-hoc network (VANET)," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 18, no. 2, 2017, pp. 133-139. doi: 10.1016/j.eij.2016.11.003
- [17] N. Todtenberg, and R. Kraemer, "A survey on Bluetooth multi-hop networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 93, 2019. doi:10.1016/j.adhoc.2019.101922
- [18] D. He, W. Sun, and L. Shi, "The Novel Mobility Models Based on Spiral Line for Aerial Backbone Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11297-11314, 2020. doi:1109/ACCESS.2020.2965616
- [19] B. H. Khudayer, M. Anbar, S. M. Hanshi, and T. Wan, "Efficient Route Discovery and Link Failure Detection Mechanisms for Source Routing Protocol," *Mobile Ad-Hoc Networks*, vol. 8, pp. 24019-24032, 2020. doi:1109/ACCESS.2020.2970279
- [20] O. S. Oubbati, M. Atiquzzaman, P. Lorenz, M. H. Tareque, M. S. Hossain, "Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81057-81105, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923840

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Performance Evaluation Of Basic Capsule Network Architecture In The Classification Of Biomedical Images

Sümevra Büşra Şengül^a, İlker Ali Özkan^b

Submitted: 06.01.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 15.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705067

ABSTRACT

Keywords: CapsNet, Res-Net, Convolutional neural networks, Medical image analysis, Dynamic routing algorithm

^a Selcuk University, Technology Faculty, Dept. of Computer Engineering 42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1385-0920
e mail:sumeyra.sengul@selcuk.edu.tr

^b Selcuk University, Technology Faculty, Dept. of Computer Engineering 42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5715-1040

*Corresponding author: sumeyra.sengul@selcuk.edu.tr

Diagnose and treat diseases, a variety of imaging techniques are used, including X-ray, computed tomography (CT), mammography, ultrasound, magnetic resonance imaging (MRI) and diffused optical tomography (DOT). Correct analysis of these medical images is required for early disease detection and application of the appropriate treatment. In image analysis, the identification of the relevant area, as well as information such as its size, location, and direction, are critical in determining the best treatment methods. The convolutional neural network (CNN) architecture is one of the most widely used deep learning architectures in medical image analysis. However, it was stated that CNN was insufficient to measure the relationship between these features while extracting image features, and it could not hide features such as pose (position, direction, size), deformation, and texture. The Basic Capsule Network (CapsNet) Architecture was proposed to overcome CNN's disadvantage and increase success. In this study, MedMNIST dataset collection consisting of medical images was used. The RetinaMNIST, BreastMNIST, and OrganMNIST-A datasets included in MedMNIST were used to evaluate the classification performance of the CapsNet architecture. Capsnet succeeded in these with accuracy rates of 54%, 85.2%, and 89%, respectively. CapsNet has been shown to produce comparable results to advanced CNN models.

Biyomedikal Görüntülerde Temel Kapsül Ağ Mimarisinin Sınıflandırma Performansının İncelenmesi

ÖZ

Hastalıkların teşhis, tanı ve tedavisinde manyetik rezonans görüntüleme (MRI), difüz optik tomografi (DOT), pozitron emisyon tomografisi (PET), bilgisayarlı tomografi (CT), mamografi, ultrason, röntgen gibi çeşitli görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır. Hastalığın erken evrelerde tespit edilebilmesi ve doğru tedavinin uygulanabilmesi bu medikal görüntülerin doğru bir şekilde analiz edilmesine bağlıdır. Görüntü analizinde ilgili alanın belirlenmesi ve o alana ait büyüklük, konum yön gibi bilgilerin tespiti doğru tedavi yöntemlerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Son on yılda oldukça hızlı gelişim gösteren derin öğrenme yöntemleri, görüntüleri ön işlem gerekmeden işleyebilmesi, hızlı ve doğru sonuçlar vermesi nedeniyle, görüntülerin sınıflandırması ve segmentasyonunda çokça kullanılmaktadır. Medikal görüntülerin analizinde en yaygın kullanılan derin öğrenme mimarilerinden birisi de evrişimli sinir ağları (ESA) mimarisidir. Ancak ESA'nın görüntü özelliklerini çıkarırken, bu özelliklerin birbirleri arasındaki ilişkiyi ölçmekte yetersiz kaldığı ve özelliklere ait poz (konum, yön, boyut), deformasyon, doku gibi özellikleri saklayamadığı belirtilmiştir. ESA'nın bu dezavantajını gidermek ve başarıyı artırmak için Temel Kapsül Ağ (CapsNet) Mimarisi önerilmiştir. Bu çalışmada medikal görüntülerden oluşan MedMNIST veri seti topluluğu kullanılmıştır. MedMNIST veri topluluğunda bulunan RetinaMNIST, BreastMNIST, OrganMNIST-A veri setleri ile CapsNet mimarisinin sınıflandırma performansı incelenmiştir. CapsNet RetinaMNIST veri setinde %54, BreastMNIST veri setinde %85.2, OrganMNIST-A veri setinde %89 başarı elde etmiştir. CapsNet'in gelişmiş ESA modelleri ile yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: CapsNet, Res-Net, Evrişimli sinir ağları, Medikal görüntü analizi, Dinamik yönlendirme algoritması

1. Introduction

Medical imaging techniques including magnetic resonance imaging (MRI), positron emission tomography (PET), computed tomography (CT), mammography, ultrasound, x-ray, diffused optical tomography (DOT) and digit pathology images are frequently used in the early diagnosis, diagnosis and treatment of various diseases [1, 26-30]. It is necessary to analyze the features of medical images quickly and accurately in order to detect the disease in the early stages, to determine the appropriate treatment, and predict the patient's response to treatment. Deep learning methods are structures that can learn these features from raw data without the need for preprocessing. With the advancement of deep learning techniques, convolutional neural networks (CNN) in medical image analysis have successfully classified data and have been widely used [2]. It also accelerates the treatment process of the patient by detecting small details that may not be noticed in the patient's symptoms [3]. However, CNN is insufficient to measure the relationship between features while extracting the features of the image. In the pooling layer, which is used to reduce the number of parameters, the location information of the features is lost due to pixel loss and the success of the method decreases. It needs more training data to improve the falling success. This leads to an increase in the number of parameters in the network and, accordingly, a prolongation of the training period [4].

In the diagnosis of the disease from medical images, it is very important to determine the relevant area and to detect the information (such as size, location, and direction) of that area. For example; the diagnosis and treatment of bleeding in intracranial hemorrhages depends on the location of the bleeding, one or more occurrences [5]. However, it is a disadvantage in the analysis of medical images that CNN cannot hide and ignore information such as pose (position, direction, size), deformation, and texture of the objects in the image.

In order to overcome these limitations of CNN and improve its success, CapsNet architecture was proposed in 2017 [6]. In CapsNet architecture, vector output capsules are used instead of CNN's scalar output feature maps, and a dynamic routing algorithm is used instead of pooling. CapsNet stores not only the objects in the image, but also the physical feature information of these objects, such as pose (position, direction, size), deformation, speed, color and texture, with capsules consisting of neuron groups [7]. Capsule network has been applied to medical images and successful results have been obtained due to these features and the ability to eliminate the deficiencies of CNN.

Radiologists must have a high level of expertise to examine and analyze brain images. However, some details may not be visible to the human eye. these cases, the image interpretation support of deep learning algorithms for correctly interpreting images can shorten the treatment process [31]. Furthermore, deep learning algorithms have been used successfully in image classification [32]. Afshar et al. [8] classified tumor types on brain MRI images. Due to CapsNet's ability to store information about each object on the image, they only segmented the tumor region to increase success. As a result of the training with the same data set, they obtained an accuracy rate of 72.13% with CNN, and an accuracy rate of 86.56% with CapsNet. Another study comparing CNN architectures and CapsNet is the detection of muscle tears in the shoulder. While they obtained 94.75% accuracy rate with CapsNet in the study, they obtained 93.21%, 88.45%, 87.63% and 85.20% accuracy rates from CNN, AlexNet and GoogLeNet, respectively [9]. CapsNet also gave very good results on retinal OCT images. In the study conducted to detect glaucoma disease on OCT images, the images were gone through various preprocessing steps such as contrast enhancement, edge detection, and bilateral filtering. Images were given to CapsNet architecture with 3 convolution layers and 94% success was achieved. ResNet-50 architecture was trained with the same images and 84% success rate was obtained [10]. Kumar et al. [11] also presented a hybrid architecture by using CapsNet architecture with VGG16 architecture. In their study on the detection of diabetic retinopathy from retinal fundus images, an accuracy rate of 74% was obtained with CNN, while an accuracy rate of 96.24% was achieved with hybrid architecture. Madhu et al. [12] also increased the number of convolutional layers in the architecture they developed for the diagnosis of malaria and made changes in the dynamic routing function. Instead of the squash function used as the activation function in the classical dynamic routing function, the ReLU activation function was used. As a result of the study, they obtained an accuracy of around 93%-95% from various CNN architectures (ResNet-50, VGG19, VGG16, InceptionV3, DenseNet121, Xception, MobileNet) and 99.03% accuracy with the CapsNet-ReLU model they developed. Yadav et al. [33] classified pneumonia from radiograph images using capsule nets and achieved 93.80% accuracy. CapsNet has been applied for the diagnosis and classification of various types of cancer and very successful results have been obtained [22-25].

CapsNet has been used for feature extraction as well as classification. In the diagnosis of diseases such as breast cancer and skin cancer, this architecture was used to extract the features of the images after the relevant region was segmented [20,21].

This study was carried out to evaluate the classification performance of CapsNet architecture on benchmark datasets and to compare it with the classification performance of different deep learning models. The basic architecture is used without any innovation in the CapsNet architecture. RetinaMNIST, BreastMNIST and OrganMNIST-A benchmark datasets in the MedMNIST[13] data collection consisting of different medical images were used in the study.

In this study, the CapsNet architecture and dynamic routing algorithm in the 2nd section, the datasets used and the performance criteria examined in the 3rd section, the software, hardware and the way the study was implemented in the 4th section, and finally the results of the study were evaluated in the 5th section.

2. CapsNet Architecture

Sabour et al. have developed CapsNet architecture in 2017 [6]. The Capsule network is deep learning architecture that stores the objects in the image and information about the objects in the image, such as pose (position, direction, size), deformation, speed, color, texture, as well as physical feature information with capsules consisting of neuron groups [7]. It stores the objects in the image and the spatial relationships of the parts that make up the objects in the transformation matrix. Thus, the object can be accurately identified even when the angle and position of the object change [14].

Architecture starts with the convolution layer. In this layer, the basic features of the image such as edges and corners are extracted and switched to the primary capsule layer. The primary capsule layer consists of convolution, reshaping, and squash functions that the capsule network architecture uses as an activation function, unlike other deep learning architectures. With the squash function, images are converted into vectorial outputs with a length between zero and one. Each capsule represents an entity in the image. The length of the output vector of the capsule indicates the probability of that entity being in the image. The next layer is the digit capsule layer. The dynamic routing algorithm that provides matching between the capsule layers is implemented in this layer. And as a result, there are as many vectors as the number of classes.

2.1. Dynamic Routing Algorithm

Dynamic routing algorithm provides matching between capsule layers. The dynamic routing algorithm is shown in Algorithm 1.

Algorithm1. Dynamic Routing Algorithm [6]

```

1:  procedure ROUTING ( $\hat{u}_{ji}, r, l$ )
2:      for all capsules  $i$  in layer  $l$  and capsule  $j$  in layer  $(l+1)$ :  $b_{ij} \leftarrow 0$ .
3:      for  $r$  iterations do
4:          for all capsule  $i$  in layer  $l$ :  $c_i \leftarrow \text{softmax}(b_i)$ 
5:          for all capsule  $j$  in layer  $(l+1)$ :  $s_j \leftarrow \sum_i c_{ij} \hat{u}_{ji}$ 
6:          for all capsule  $j$  in layer  $(l+1)$ :  $v_i \leftarrow \text{squash}(s_j)$ 
7:          for all capsule  $i$  in layer  $l$  and capsule  $j$  in layer  $(l+1)$ :  $b_{ij} \leftarrow b_{ij} + \hat{u}_{ji} v_{ij}$ 

return  $v_j$ 

```

In the algorithm, b_{ij} is the temporary similarity variable with an initial value of 0. Its value is updated in iteration. c_{ij} matching coefficients are calculated by passing b_{ij} through the softmax function

(Equation (1)).

$$c_{ij} = \frac{\exp(b_{ij})}{\sum_k \exp(b_{ik})} \tag{1}$$

$$\hat{u}_{j|i} = W_{ij}u_i \tag{2}$$

$$s_j = \sum_i c_{ij}\hat{u}_{j|i} \tag{3}$$

As shown in Equation (2), the input values of the capsule u_i are multiplied by the weight matrix W_{ij} to get the estimated output vector $\hat{u}_{j|i}$ of the capsule. The product of the prediction vector and the matching coefficient is summed up and the weighted sum s_j is found (Equation (3)). The value of s_j is passed through the squash function and the output value of the capsule, v_j , is calculated. The equation of the squash function is shown in Equation (4). The squash function brings short vectors closer to 0 and long vectors closer to 1.

$$v_j = \frac{\|s_j\|^2}{1+\|s_j\|^2} \cdot \frac{s_j}{\|s_j\|} \tag{4}$$

In the last step of the algorithm, b_{ij} is updated with the formula shown in Equation (5) and all steps are repeated from step 4 as many as r .

$$b_{ij} = b_{ij} + \hat{u}_{j|i}v_{ij} \tag{5}$$

2.2. Loss Function (Margin Loss)

In the last layer, the digit capsule layer, the margin loss is calculated for each capsule. With this calculation, it is determined whether the object is in the image or not.

$$L_k = T_k \max(0, m^+ - \|v_k\|)^2 + \lambda(1 - T_k) \max(0, \|v_k\| - m^-)^2 \tag{6}$$

The formula shown in Equation (6) is used to calculate the margin loss. If the prediction is correct, $T_k=1$ is taken, otherwise $T_k=0$. The lambda value is taken as 0.5. m^+ is 0.9 and m^- is 0.1. The total loss is found by adding the losses of the capsules.

2.3. Network Architecture

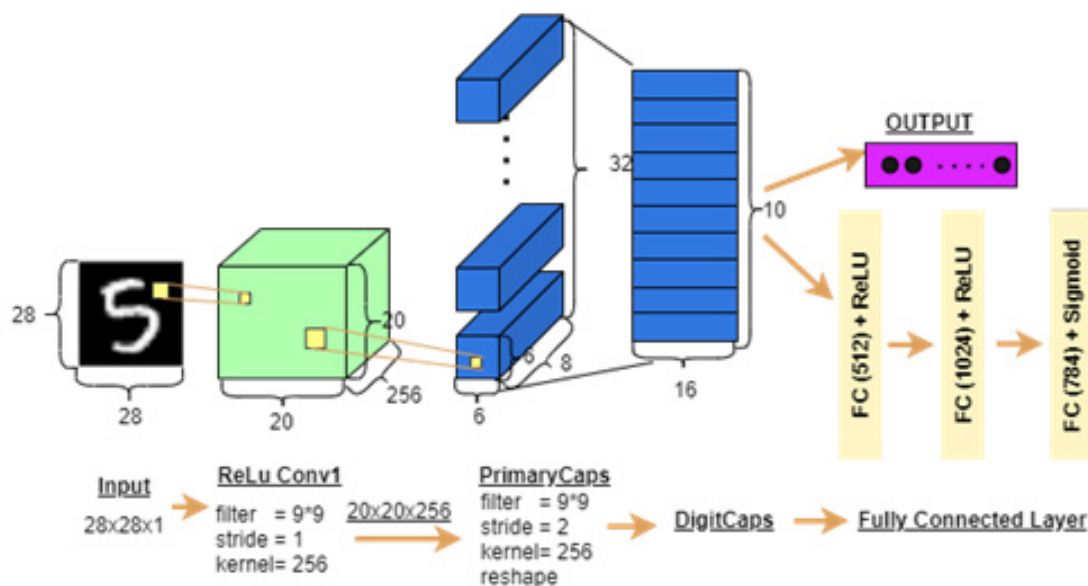


Figure 1. CapsNet Architecture

CapsNet Architecture consists of two parts, encoder and decoder. The decoder part reconstructs the image, while the encoder extracts the features and classifies the image.

Figure 1 shows the CapsNet architecture. In architecture, the first layer is the convolution layer, from which the basic features of the image such as edges and corners are extracted. It takes 28×28 single channel images as input. After convolution with 256 core size, 9×9 filter and 1 step number, $20 \times 20 \times 256$ sized output tensor is obtained. The second layer is the primary capsule layer. The convolution operation is applied to the input tensor with the size of $20 \times 20 \times 256$ as 256 kernel size, 9×9 filter and number of steps 2. From the obtained $6 \times 6 \times 256$ dimensional tensor, 32 8-dimensional capsules ($6 \times 6 \times 8 \times 32$) are encapsulated by the reshaping process. The squash function is used as the activation function at the layer output. The last layer is the digit capsule layer. This layer is the one where the dynamic routing function is used. As a result of the dynamic routing algorithm from the ($6 \times 6 \times 8 \times 32$) input tensor, 10 capsules, each of which has 16 dimensions, are formed. The capsule with the highest probability value out of the capsules gives the output. After this layer, the loss calculation is made and the image is reconstructed with fully connected layer [6].

3. Experimental Setup

3.1. MedMNIST Dataset

MedMNIST is a 28×28 dimensional collection of medical open datasets [13]. It consists of 10 2-dimensional (28×28) data sets. All datasets are divided into train, validation and test data.

The MedMNIST data collection consists of various images such as X-ray, OCT, ultrasound, CT. All datasets included in MedMNIST are open-to-use datasets under a Creative Commons (CC) license.

In this study, 3 data sets in MedMNIST were used. The datasets used are RetinaMNIST, BreastMNIST, OrganMNIST-A. In Table 1, train, test and validation samples and rates of the data sets are given.

Tablo 2. The sample of train, test and validation data; Train, test and validation ratio

Datasets	Train Data	Test Data	Validation Data	Train Rate	Test Rate	Validation Rate
<i>RetinaMNIST</i>	34581	17778	6491	60%	30%	10%
<i>BreastMNIST</i>	1080	400	120	67.5%	25%	7.5%
<i>OrganMNIST-A</i>	546	156	78	70%	20%	10%

3.1.1. RetinaMNIST

RetinaMNIST consists of diabetic retinopathy fundus images from the DeepDR dataset. It consists of 5 classes as no apparent, mild non-proliferative, moderate non-proliferative, severe non-proliferative and proliferative diabetic retinopathy [15]. Samples from the data set are presented in Figure 2.

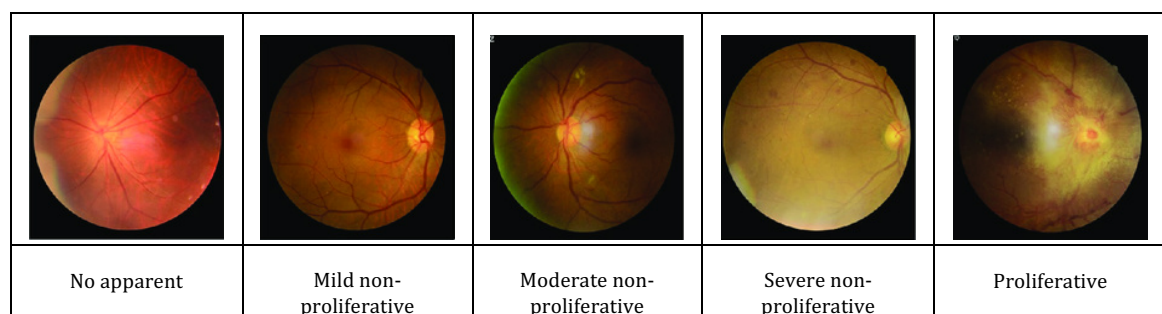


Figure 2. RetinaMNIST image samples [15]

3.1.1. BreastMNIST

BreastMNIST consists of 780 breast ultrasound images from the Bahaya Hospital Breast Ultrasound dataset. It is divided into 3 classes as normal, benign and malignant [16]. For classification, normal and benign images were classified as positive and malignant images as negative. Samples of normal, benign

and malignant cysts are shown in Figure 3.

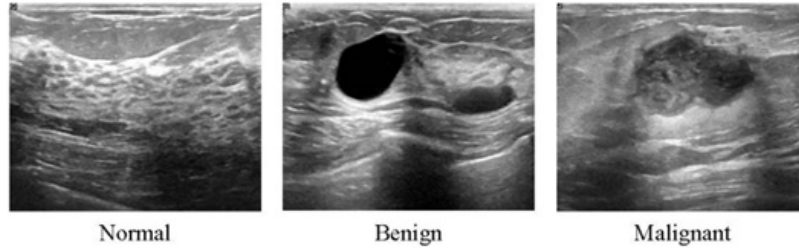


Figure 3. BreastMNIST image samples [16]

3.1.1. OrganMNIST-A

OrganMNIST- (Axial) consists of 131 abdominal CT images of the liver taken from the LiTS dataset. 11 organs are labeled in the axial plane [17]. An image sample in the axial plane is given in Figure 4.

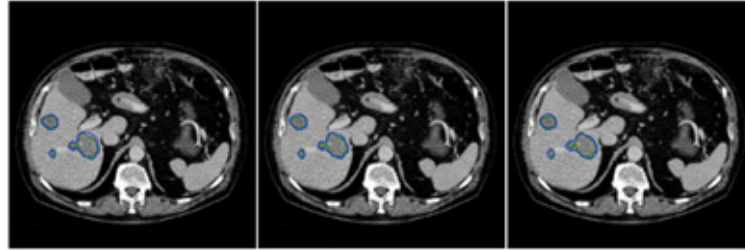


Figure 4. OrganMNIST-A image samples [17]

3.2. Performance Metrics

Accuracy criteria are used to evaluate the performance of the CapsNet architecture and compare it with known models.

Accuracy, precision, sensitivity and f1-score values were calculated to scale and evaluate the performance of the architecture on medical images. Since the datasets used are multi-class, macro-precision, macro-sensitivity and macro-f1 score formulas were taken into account while calculating the metric (2). The formulas are detailed in Table 2.

Tablo 2. Formulas of Performance Metrics [18]

Metric	Formula
Accuracy	$\Sigma_{i=1}^l = \frac{tp_i + tn_i}{tp_i + fn_i + fp_i + tn_i}$
Precision (P_M)	$\Sigma_{i=1}^l = \frac{tp_i}{tp_i + fp_i}$
Recall (R_M)	$\Sigma_{i=1}^l = \frac{tp_i}{tp_i + fn_i}$
f1-score (F_M)	$\frac{(\beta^2 + 1)P_M R_M}{\beta^2 P_M + R_M}$

4. Results and Discussions

This study was carried out on a device with Python 3.8, Tensorflow2.3, CUDA10.1.243, cuDNN7.6.5 technologies, Intel Xeon Gold 6226R processor, Nvidia Grid RTX8000-12Q graphics card. In the creation of the CapsNet model, the study at the address “<https://github.com/XifengGuo/CapsNet-Keras>” was used [19].

In the study, BreastMNIST, RetinaMNIST and OrganMNIST-A datasets were used to evaluate the classification performance of the CapsNet architecture. The datasets in the MedMNIST data collection are given as 28*28 sized, and they are also divided into train, test and validation. Therefore, no sizing

or parsing was done in the datasets in the study. The datasets were used as is. Retina-MNIST and OrganMNIST-A datasets are multi-class, BreastMNIST dataset is a binary class.

In this study, different deep learning models were used to compare the performance of CapsNet Architecture. These models are Resnet-18, Resnet-50, Auto-sklearn, AutoKeras, Google AutoML Vision [13]. The accuracy values of these models and the accuracy value we obtained from the CapsNet architecture in our study are presented in Table 3. According to Table 3, CapsNet achieved an accuracy rate of 54% on retinal fundus images, 85.2% on breast ultrasound images, and 89% on Organ CT axial plane images, respectively. In addition, the parameter values (number of periods, batch size and learning rates) used in each data set to obtain the best results are given in Table 4. Table 5 shows the performance metrics of the CapsNet model on the RetinaMNIST, BreastMNIST and OrganMNIST-A datasets. The complexity matrices of the data sets used in Figure5, Figure6 and Figure7 are presented.

Tablo 3. Performance Metrics of CapsNet on Different Datasets

Methods	RetinaMNIST	BreastMNIST	OrganMNIST-A
<i>Resnet-18</i>	0.515	0.859	0.921
<i>Resnet-50</i>	0.490	0.853	0.916
<i>Auto-sklearn</i>	0.525	0.808	0.563
<i>Auto-Keras</i>	0.420	0.915	0.929
<i>Google AutoML Vision</i>	0.530	0.865	0.818
<i>CapsNet</i>	0.540	0.852	0.890

Tablo 4. Parameter Values

Datasets	The Numbers of Epoch	Batch Size	Learning Rate
<i>RetinaMNIST</i>	50	100	0.0008
<i>BreastMNIST</i>	50	8	0.0007
<i>OrganMNIST-A</i>	25	256	0.001

Tablo 5. Performance Metrics of CapsNet on Different Datasets

Methods	RetinaMNIST	BreastMNIST	OrganMNIST-A
<i>Accuracy</i>	0.540	0.852	0.890
<i>Precision (P_M)</i>	0.340	0.895	0.901
<i>Recall (R_M)</i>	0.376	0.735	0.882
<i>f1-score (F_M)</i>	0.340	0.77	0.892

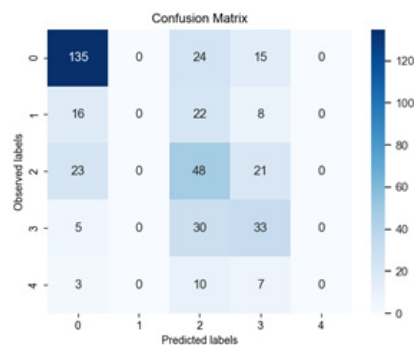


Figure 5. RetinaMNIST Confusion Matrix

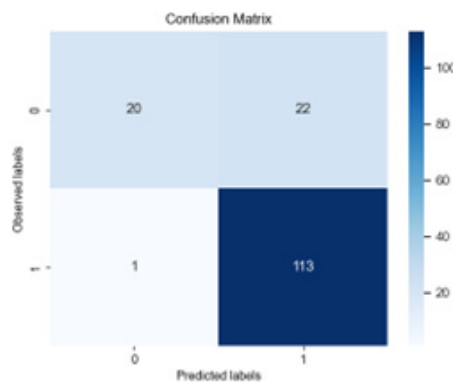


Figure 6. BreastMNIST Confusion Matrix

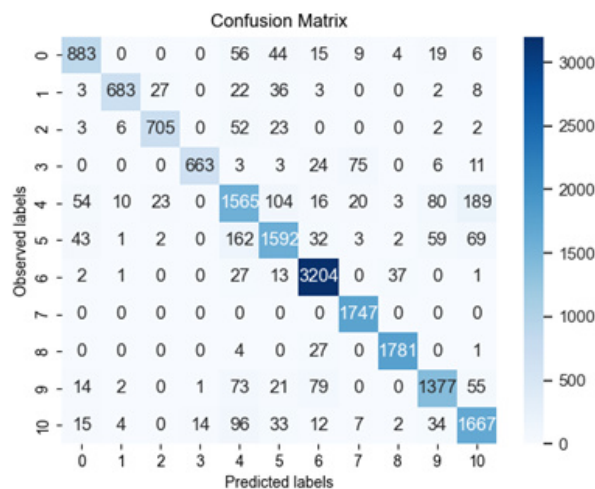


Figure 7. OrganMNIST-A Confusion Matrix

5. Conclusions

Although CNN models achieve very high success in image analysis, since they cannot store information such as the pose (position, direction, size) of the objects on the image, they cannot perform accurate analysis when they encounter images of the object at different angles. CapsNet is an architecture developed to overcome these shortcomings of CNN. In this study, the performance of CNN, which has achieved high success in the analysis of medical images, and CapsNet were compared.

In the literature, it has been seen that CapsNet architecture gets close results with CNN models in image classification. Examining the training results, the basic CapsNet architecture yielded very close results with 18-layer ResNet, 50-layer ResNet, and advanced multi-layered architectures such as Auto-sklearn, AutoKeras, Google AutoML Vision, which try to find the best model according to the data. While results close to these models were obtained in the BreastMNIST and OrganMNIST-A datasets, a better accuracy rate was obtained than these models in the RetinaMNIST dataset.

As a result of the literature review and training results, it is thought that higher success can be achieved with differences such as increasing the number of convolution layers, making innovations in the dynamic routing function, and using it with different architectures of the CapsNet architecture, which has fewer layers and a simpler structure than advanced architectures.

Acknowledgements

We would like to thank the Scientific Research Coordinatorship of Selcuk University for their support with the project titled "Data Intensive and Computer Vision Research Laboratory Infrastructure Project" numbered 20301027.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] K. Raza and N. K. Singh, "A Tour of Unsupervised Deep Learning for Medical Image Analysis," *Current Medical Imaging Reviews*, vol. 17, no. 9, pp. 1059–1077, Sep. 2021. doi:10.2174/1573405617666210127154257
- [2] S. M. Anwar, M. Majid, A. Qayyum, M. Awais, M. Alnowami, and M. K. Khan, "Medical Image Analysis using Convolutional Neural Networks: A Review," *Journal of Medical Systems*, vol. 42, no. 11, p. 226, Oct. 2018. doi:10.1007/s10916-018-1088-1
- [3] M. M. Qanbar and S. Taşdemir, "Detection of Malaria Diseases with Residual Attention Network," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 238–244, Dec. 2019. doi:10.18201/ijisae.2019457677
- [4] M. Kwabena Patrick, A. Felix Adekoya, A. Abra Mighty, and B. Y. Edward, "Capsule Networks – A survey," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 1, pp. 1295–1310, Jan. 2022. doi: 10.1016/j.jksuci.2019.09.014
- [5] D. Kirbaş, "İntraserebral Kanamanın Tibbi Tedavisi," *Dusunen Adam The Journal of Psychiatry and Neurological Sciences*, vol. 7, no. 4, p. 54, 1994.
- [6] S. Sabour, N. Frosst, and G. Hinton, "Dynamic Routing Between Capsules", in *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, 4-9 Dec 2017, [Online]. Available: <https://proceedings.neurips.cc>. [Accessed: 13 August 2023].
- [7] X. Zhang and S.-G. Zhao, "Fluorescence microscopy image classification of 2D HeLa cells based on the CapsNet neural network," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 57, no. 6, pp. 1187–1198, Jun. 2019. doi:10.1007/s11517-018-01946-z
- [8] P. Afshar, A. Mohammadi, and K. N. Plataniotis, "Brain Tumor Type Classification Via Capsule Networks," in *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Oct. 2018, Athens, Greece*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8451379>. [Accessed: Aug. 13, 2023].
- [9] A. Sezer and H.B. Sezer, "Capsule Network-Based Classification Of Rotator Cuff Pathologies From MRI," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 80, pp. 106480, Dec. 2019. doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.106480
- [10] J. Gaddipati, A. Desai, J. Sivaswamy and K. A. Vermeer, "Glaucoma Assessment From OCT Images Using Capsule Network", in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Jul. 2019, Berlin, Germany*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8857493>. [Accessed: Aug. 13, 2023].
- [11] G. Kumar, S. Chatterjee, and C. Chattopadhyay, "DRISTI: A Hybrid Deep Neural Network For Diabetic Retinopathy Diagnosis," *Signal Image Video Process*, vol. 15, no. 8, pp. 1679–1686, Apr. 2021. doi: 10.1007/s11760-021-01904-7
- [12] G. Madhu et al., "Imperative Dynamic Routing Between Capsules Network for Malaria Classification," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68 no.1, pp. 903-919, Mar. 2021. doi:10.32604/cmc.2021.016114
- [13] J. Yang, R. Shi and B. Ni, "MedMNIST Classification Decathlon: A Lightweight AutoML Benchmark for Medical Image Analysis," in *2021 IEEE 18th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Apr. 2021, Nice, France*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2010.14925>. [Accessed: Aug. 13, 2023].
- [14] G. E. Hinton, S. Sabour, and N. Frosst, "Matrix capsules with EM routing," *International Conference on Learning Representations*, 30 April– 3 May. 2018. [Online]. Available: <https://openreview.net/> [Accessed: Aug. 13, 2023].
- [15] R. Liu et al., "DeepDRiD: Diabetic Retinopathy—Grading and Image Quality Estimation Challenge," *Patterns*, vol. 3, no. 6, p. 100512, Jun. 2022. doi:10.1016/j.patter.2022.100512
- [16] W. Al-Dhabyani, M. Gomaa, H. Khaled, and A. Fahmy, "Dataset Of Breast Ultrasound Images," *Data in Brief*, vol. 28, pp. 104863, Feb. 2020. doi:10.1016/j.dib.2019.104863
- [17] P. Bilic et al., "The Liver Tumor Segmentation Benchmark (Lits)," *Medical Image Analysis*, vol. 84, pp. 102680, Feb. 2023. doi:10.1016/j.media.2022.102680
- [18] M. Sokolova and G. Lapalme, "A Systematic Analysis Of Performance Measures For Classification Tasks," *Information Processing and Management*, vol. 45, no. 4, pp. 427–437, July 2009. doi: 10.1016/j.ipm.2009.03.002
- [19] X. Guo, "CapsNet-Keras." Aug. 10, 2023. Accessed: Aug. 13, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/XifengGuo/CapsNet-Keras>
- [20] D. Adla, G. V. R. Reddy, P. Nayak, G. Karuna, "Deep Learning-Based Computer Aided Diagnosis Model For Skin Cancer Detection And Classification," *Distrib and Parallel Databases*, vol. 40, no. 4, pp. 717–736, Dec. 2022. doi: 10.1007/s10619-021-07360-z
- [21] T. Kavitha et. al., "Deep Learning Based Capsule Neural Network Model for Breast Cancer Diagnosis Using Mammogram

Images," *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 113–129, Mar. 2022. doi:10.1007/s12539-021-00467-y

[22] R. LaLonde, P. Kandel, C. Spampinato, M. B. Wallace and U. Bagci, "Diagnosing Colorectal Polyps in the Wild with Capsule Network", in *2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), Apr. 2020, Iowa, USA*. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2001.03305>. [Accessed: Aug. 13, 2023].

[23] S. C. Satapathy, M. Cruz, A. Namburu, S. Chakkaravarthy, and M. Pittendreich, "Skin Cancer classification using Convolutional Capsule Network (CapsNet)," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 79, no. 11, Art. no. 11, Apr. 2020. doi:10.56042/jsir.v79i11.35913

[24] M. Ali and R. Ali, "Multi-Input Dual-Stream Capsule Network for Improved Lung and Colon Cancer Classification," *Diagnostics*, vol. 11, no. 8, pp.1485, Aug. 2021. doi: 10.3390/diagnostics11081485

[25] C. Peng, Y. Zheng, and D.-S. Huang, "Capsule Network Based Modeling of Multi-omics Data for Discovery of Breast Cancer-Related Genes," *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, vol. 17, no. 5, pp. 1605–1612, Sep. 2020. doi:10.1109/TCBB.2019.2909905

[26] F. Xue and J. Jiang, "Dynamic Enhanced Magnetic Resonance Imaging versus Ultrasonic Diffused Optical Tomography in Early Diagnosis of Breast Cancer," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2022, p. e4834594, Apr. 2022, doi: 10.1155/2022/4834594

[27] Y. A. Üncü, G. Sevim, and M. Canpolat, "Approaches to preclinical studies with heterogeneous breast phantom using reconstruction and three-dimensional image processing algorithms for diffuse optical imaging," *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 343–353, 2022. doi: 10.1002/ima.22648

[28] Y. A. Üncü, G. Sevim, T. Mercan, V. Vural, E. Durmaz, and M. Canpolat, "Differentiation of tumoral and non-tumoral breast lesions using back reflection diffuse optical tomography: A pilot clinical study," *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 2023–2031, 2021. doi: 10.1002/ima.22578

[29] K. M. S. Uddin, M. Zhang, M. Anastasio, and Q. Zhu, "Optimal breast cancer diagnostic strategy using combined ultrasound and diffuse optical tomography," *Biomed. Opt. Express, BOE*, vol. 11, no. 5, pp. 2722–2737, May 2020. doi: 10.1364/BOE.389275

[30] E. Y. Chae et al., "Development of digital breast tomosynthesis and diffuse optical tomography fusion imaging for breast cancer detection," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, Art. no. 1, Aug. 2020. doi:10.1038/s41598-020-70103-0

[31] M. Yeo et al., "Review of deep learning algorithms for the automatic detection of intracranial hemorrhages on computed tomography head imaging," *Journal of NeuroInterventional Surgery*, vol. 13, no. 4, pp. 369–378, Apr. 2021. doi: 10.1136/neurintsurg-2020-017099

[32] T. Danişman et al., "Predicting The Location Of The Uterine Cervical Os From 2d Images With Cnn" *JESD*, vol. 8, no. 5, Art. no. 5, Dec. 2020. doi: 10.21923/jesd.828457

[33] S. S. Yadav and S. M. Jadhav, "Deep convolutional neural network based medical image classification for disease diagnosis," *J Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 113, Dec. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0276-2.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Storage of Developed Distributed Machine Learning Models on Blockchain

Remzi Gürfidan^a, Mevlüt Ersoy^b

Submitted: 10.11.2022 Revised: 21.06.2023 Accepted: 09.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705068

ABSTRACT

Keywords: Distributed learning, machine learning, blockchain, secure storage of model

^a Isparta University of Applied Sciences,
Yalvac Vocational School of Technical Sciences;
Computer Programming
32100 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4899-2219
e mail: remzigurfidan@isparta.edu.tr

^b Süleyman Demirel University,
Engineering Faculty,
Computer Engineering
32500 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2963-7729
e mail: mevlutersoy@sdu.edu.tr

*Corresponding author:
remzigurfidan@isparta.edu.tr

In this study, a dataset containing air pollution information collected from different locations is used. This dataset contains air pollution measurement data and result information for 25 different regions of Seoul. The values obtained from similar regions were filtered from the whole dataset and a dataset specific to these regions was created. As the next step, the model was trained with the values obtained in their regions and the model was registered. This model shows very successful results when tested with the data obtained in their own regions. However, when tested with data obtained from different regions and not similar to these regions, the classification success of the model was very low. The aim of this study is to show that more successful results can be obtained with the distributed learning method, which can be a solution to this problem situation, compared to classical machine learning. In addition, security problems during model merging and clustering should not be ignored in Distributed Learning. For this reason, a robust blockchain-based approach is proposed against malicious attacks during model distribution.

Geliştirilen Dağıtılmış Makine Öğrenimi Modellerinin Blok Zincirde Depolanması

ÖZ

Bu çalışmada farklı lokasyonlardan toplanan hava kirliliği bilgilerini içeren bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti Seul şehrinin 25 farklı ilçesine ait hava kirliliği ölçüm bilgileri ve sonuç bilgilerini içermektedir. Benzer bölgelerden elde edilen değerler tüm veri seti içerisinde filtrelenerek bu bölgelere has veri seti oluşturulmuştur. Sonraki işlem basamağı olarak, kendi bölgelerinde elde edilen değerler ile eğitilip model kaydedilmiştir. Bu model kendi alanlarında elde edilen veriler ile test edildiğinde oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Fakat farklı bölgelerden elde edilen ve bu bölgeler ile benzeşmeyen veriler ile test edildiğinde model sınıflama başarısı oldukça düşük kalmıştır. Çalışmanın amacı bu problem durumuna çözüm olabilecek olan dağıtık öğrenme yöntemi ile klasik makine öğrenmesine kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilebileceğini göstermektir. Bunun yanında Dağıtık Öğrenme kısmında model birleştirme ve toplama esnasındaki güvenlik sorunlarının da göz ardı edilmemelidir. Bu sebeple model dağıtım sırasında kötü niyetli saldırılara karşı blockchain tabanlı sağlam bir yaklaşım önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık öğrenme, makine öğrenmesi, blok zinciri, modelin güvenli depolanması

1. Introduction

The latest design is the trend of design students design used all over the world. In an enterprise that does not want to be behind the times, people like a production facility and those who prefer people's plans. With the development attacks of the internet of things (IoT) technology, it has made great innovations such as smart home systems and smart city planning. In addition, the data emerging in these systems or the protection and security of these systems can be mentioned. The emergence of these vulnerabilities depends on cyber security and the path it follows. The latest system, which is the brightest of its content, is the Blockchain technology, which uses the ledger structure, without meeting the manipulation of data [1]. This emerging technology with crypto flamboyance has successfully demonstrated digital experience and experience. The smart intelligences for this system include the trainings of the model. The model that performs learning with this orientation is related to its ability to predict classification in data samples depending on the preferred options [2].

The sources of motivation for this study can be listed as follows.

- In this study, a method has been developed that can ensure the security of artificial intelligence applications performed by ignoring the security parameter.
- More successful results were obtained with the distributed learning method compared to classical machine learning.
- The data privacy problem related to the data used in artificial intelligence model training has been prevented.
- There are security problems during model aggregation and aggregation in the Distributed Learning section. It is necessary to propose a robust approach against malicious attacks during model collection [3]. Storing the weights presented in this study with the blockchain provides a solution to this problem by preventing manipulation.

In this research study, distributed learning, weight files of artificial intelligence model, blockchain technology, Hyperledger Fabric infrastructure are explained as the subtitles of the introduction. In the second part, studies in which blockchain and distributed learning are used together are examined. In the third chapter, methods and techniques are explained about why weight files should be stored in a distributed learning model and how they can be stored with smart contracts. In the fourth part of the study, the performance measurements of the process performed were carried out and the findings were revealed. In the last part of the study, the values obtained in the light of the findings were discussed and the results and future study objectives were listed.

2. Technology and Methods Used in the Study

In this section, the frameworks that will be used in the structure to be realized in this research study are examined. Distributed learning, blockchain and Hyperledger fabric framework, model weights in machine learning are discussed.

2.1. Distributed Learning

Distributed learning is a machine learning technique that trains algorithms on a server or servers, in which data from more than one independent device is stored in an anonymized form.

In distributed learning, each of the various devices that are part of the learning network has a copy of the machine learning model. Different devices train the copy of the machine learning model using the device's local data, and then the parameters in different machine learning models collect the parameters and send them to a master device or server that updates the overall machine learning model accordingly. This training process can be repeated until the desired level of accuracy is achieved. In short, the main idea behind federated learning is that none of the training data is transmitted between devices or parties, only updates to the model are shared [4]. Distributed learning is the darling of an innovative generation of smart networks where smart devices such as mobile hardware, robots and sensors exchange information with each other to collaboratively train machine learning models without offloading raw data information to a central entity for centralized processing. The distributed learning paradigm can reduce the load on centralized processors by using the computational or communication capacity of individual agents and contributes to the protection of users' data privacy

[5]. In distributed learning systems, it is a collaborative learning method that protects the privacy of users' original data and does not share it with third parties. Recently, it has been attracting more and more attention and use. The combination of federation and machine learning is becoming a hot new research topic. All these reasons have been a serious motivation for the choice of distributed learning in this study [6].

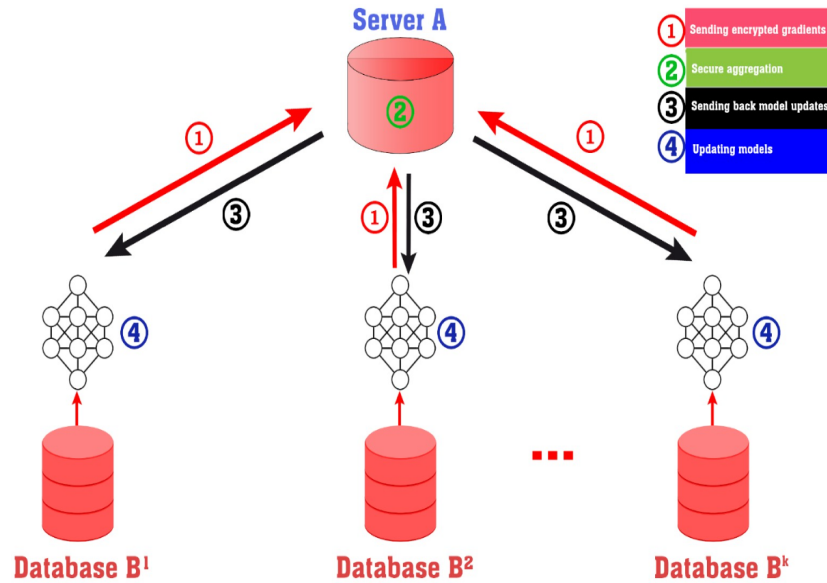


Figure 1. Distributed learning system model

For the appropriate usage scenario of this technique, it is necessary to pay attention to the motivation of choice in a sample application. In the said scenario, it is desired to have more instructive materials for the machine learning model by combining the data obtained by similar purpose systems in different locations. It is known that the more successful learning condition of machine learning models and the increase in the number of heterogeneous data is the most important issue. However, at this very moment, the laws on the protection of personal data and the concepts of data privacy have come into play. In the General Data Protection Regulation (GDPR) criteria, important aspects regarding data privacy and the protection of personal data are guaranteed. According to the GDPR criteria, the data of both parties cannot be transferred or combined without the consent of their respective users [7], [8]. Since the model weights are updated and transferred instead of transferring the data in the federated learning technique, the data is anonymized, thus contributing to the solution of the data privacy problem [3].

2.2. Weight Files in Machine Learning Models

In the developed machine learning models, the progress of the model can be recorded either during the training of the model or after the training is completed. One of the purposes of this process is to ensure that the model can continue its training from where it left off, considering that the training will take a long time. Another purpose is to facilitate the sharing of the saved model. In addition, the time and effort cost of developing machine learning models is very high. Turning off the hardware where the training is performed causes all weights of the model to be lost while the memory is freed. Saving models is critical to optimize reusability to make the most of your time. To better understand the importance of this recorded data file, it is necessary to know the technical infrastructure of how the model developed with machine learning performs the prediction or classification process. The data presented to the machine learning model to be developed are usually labeled as input parameters and output parameter or parameters. Thanks to this labeling, the model that will develop learning discovers meaningful ways to reach the output parameter from the input parameters, depending on the algorithm to be used, and connects these ways to a mathematical model within itself. In this fully created mathematical discovery model, the data we call weight is revealed. These weight data have the value that determines which input parameter will be more dominant and effective in accessing the output parameter. The estimation or classification success of the model that has completed its training is directly related to the correct determination of the created weights and is primarily effective. Within the weight files, there are only meaningful numerical data for the model, completely independent of

the data used in the training. For weight files, it would be correct to say an anonymized dataset in which all the experience that can be obtained from the original data is summarized and packaged.

Research has been carried out on different methods and techniques on saving the weights of the prepared machine learning models and saving the model. This feature, which enables a ready-made model to be used faster and more effectively by saving the time spent in the training process, provides a very time-saving benefit. When the state of the literature in this field is analyzed, a review study on saving, loading and recalling machine learning models [9], research on different methods for saving and loading machine learning models consistently [10] and different methods for saving weights [11] are presented.

2.3. Blockchain and Hyperledger Fabric Framework

Blockchain is a chain structure consisting of interconnected blocks. Blockchain can be thought of as a distributed database. The data on the blockchain system is stored in a ledger technology that can be shared and cannot be changed [12]. Advantages of using the blockchain system [13], [14];

- Transactions to be made can be carried out cheaply and quickly, without being tied to a center or person.
- Manipulation and fraud are prevented as all transactions performed on the distributed ledger technology can be checked and verified.
- Thanks to its distributed data storage capability, it has a resilient and strong structure against the attacks it will be exposed to.
- Since it is based on the mathematical model, there is almost no margin for error.
- It provides transparency since all members will have a peer copy of the records stored in the distributed ledger technology.
- Thanks to smart contracts, transaction security and protocols are realized securely and quickly without the possibility of denial or denial.

The Hyperledger project is an open source, permissioned, distributed ledger established by the Linux Foundation [15]. This project is divided into thirteen projects. These projects have been introduced as Fabric, Sawtooth, Indy, Burrow, Iroha, Grid, Aries, Caliper, Cello, Composer, Explorer, Quilt, Ursa [16], [17].

3. Related Work

Blockchain technology and machine learning technology separately are interesting fields of study for many researchers. When the literature is examined, the number of studies in these subject areas is quite high. The use of these two workspaces together usually includes the keywords security and communication.

Quantitatively large amounts of data and large edge devices present significant security, privacy, service delivery, and network management challenges. The joint evaluation of blockchain and machine learning (ML) provides significant benefits in this regard [18]. Realizing this problem area and lack, Liu et al. carried out research on the integration of blockchain and machine learning. Among the results of their studies, they concluded that it would be efficient to combine this field with larger fields such as IoT (Internet of Things), Big Data and Edge Computing [19]. Adhikari and Song proposed a joint Blockchain-based reputation system to minimize double spend and linear regression-based machine learning to reduce system-induced latency in the field of wireless virtualization. The results obtained in the study showed that the proposed approach outperforms other approaches in terms of expected latency as well as expected utility for wireless virtualization [20]. Shinde and his team propose a technological solution to eliminate the insecurities in road construction processes in India. This recommendation system envisages that the main challenges of traditional road construction contracting systems, which rely heavily on limited available data and assumptions regarding raw materials and traffic behavior, will be effectively resolved. An artificial intelligence model to be developed will perform the time and cost estimation of road construction operations. Blockchain structure, on the other hand, will ensure the integrity of the work-time contract and reconciliation between the stakeholders [21].

Table 1. Detailed and comparative analysis table of existing studies

Work / Year	Type of Algorithm	Type of Blockchain	The Aim of The Study	Contribution of The Study
[22] (2022)	SVM, KNN	No Framework, Self-made blockchain	It provides a framework for analyzing and detecting interference with real-time network data, identifying multiple potentially harmful interference patterns.	SVM outperformed all trained models, achieving 99.05% DA and 0.95% MCR (powered by blockchain technology) to overcome security threats to networking and transaction data
[23] (2018)	Semi-supervised learning	No Framework, Self-made blockchain	Proposes to create a reliable machine learning system using blockchain technology that can store data in a permanent and immutable way.	It establishes a link between machine learning technology and blockchain technology. It proposes a unified analytical framework for reliable machine learning using blockchain technology.
[24] (2020)	Bayes Network based Filtering scheme	No Framework, Self-made blockchain	She proposed a scalable and efficient method to protect the allowed blockchain in the SDN domain from DDoS attack.	It has been seen that the created machine learning model can detect attacks with high accuracy and is safe to protect blockchain applications from DNS Amplification attacks.
[25] (2019)	Similarity Learning	Ethereum	Desired to develop a smart contract-based data trading mode solution and framework using blockchain and machine learning	Authentication in the trade performed, prevention of off-chain verification, resolution of disputes during data trade, automatic payment of the balance, and the creation of dishonest behavior penalties are provided.
[26] (2021)	Deep Learning	No Framework, Self-made blockchain	A model based on integrating edge computing, blockchain technology and machine learning is proposed to support the design of the manufacturing system.	The assignment problem of the system is formulated based on the optimization model.
[27] (2019)	Supervised & Un supervised Learning	No Framework, Self-made blockchain	It is desired to propose a secure model that will be beneficial for institutions and individuals operating in the field of health and focuses on patients' access to data from anywhere.	Data in the field of health are shown by ensuring data privacy for doctors and patient relatives. Patient data is used for disease classification with machine learning
[28] (2021)	Deep Extreme Learning Machine	No Framework, Self-made blockchain	It is aimed to propose a blockchain-based machine learning approach for network security in smart home technologies.	A lightweight yet effective solution is proposed for intrusion detection and prediction in smart home networks.
[29] (2020)	SVM	Hyperledger Fabric	The study plans to propose a smart fitness service with the help of an advanced smart contract on blockchain networks.	A real-time inference engine has been developed. The system also predicts the future diet plan and exercise plan for the patient and guarantees its safety
[30] (2021)	-	Hyperledger Fabric	The study proposed a Hyperledger Fabric Architecture for the secure and efficient management of EHRs systems.	We created a trusted and transparent encyclopedia of patient data in the study, ensuring controlled data access and integrity for the widest stakeholders of the EHR system.
[31] (2021)	-	Hyperledger Fabric	The aim is to increase security in IoT-based health monitoring systems, achieve better storage utilization due to limited storage space, decentralized accountability and eliminate single point of failure.	In this study, a security enhanced model for Hyperledger Fabric based IoT based health monitoring systems is proposed. Alternative solutions to the limitations are presented.
[32] (2020)	-	Hyperledger Fabric	The aim of this paper is to propose an efficient decentralized data integrity checking scheme based on Hyperledger Fabric to address the security and scalability challenges in legacy TPA-based data integrity checking schemes.	It is the first attempt to investigate this area. They formulate the TPA selection model, and two selection algorithms are prepared under complete and incomplete information, which can quickly select TPAs that satisfy users
This Work	Decision Tree	Hyperledger Fabric	Secure storage of the model developed in the distributed learning model and the weights of the model	Creating a secure distributed learning model, increasing machine learning accuracy values by creating a global model

When the academic studies carried out before this study are examined, Table 1 shows the aims of the studies and the innovations they have contributed to the literature. although different algorithms are preferred in many similar studies, studies have generally been carried out on security and data privacy. in this study, in addition to data privacy and security, data anonymization fiction has an important

place. In [R6], a process was followed to create an encyclopedia by storing raw data securely and transparently and sharing it with healthcare organizations in a controlled manner. In [R7], raw data collected from IoT devices are kept in a local chain. Afterwards, the data in the local chain is sent to a global cloud chain with gateways. the aim here is to eliminate the single point error that may occur in the two chains that are kept for verification purposes from the other. in addition, performance measurements in this study do not contain any information about the scalability of the infrastructure created by taking place in future study targets. Unlike [R7], in this work, the data itself is not stored, but the weights kept in the machine learning model. this is perfect for data anonymization in distributed learning machine learning. Since it does not contain meaningful expressions like the original data, there is no threat to personal data. The work carried out in [R8] involves quite extensive and detailed processes. In this study, a new algorithm is proposed to increase efficiency and scalability. Since the TPA process is carried out in a way to include a third verification, it has exceeded the standard security of Hyperledger Fabric. Comparing this study with [R8], it can be said that it has higher level security protocols. In [R8], it is seen that the existing verification processes add additional processing time to the blockchain. Although we have to accept its superiority in terms of security, it is important to establish the optimum performance and security relationship.

In this study, Hyperledger Fabric developed by IBM was used as the blockchain infrastructure. The reason for this choice is to harness the power of a truly distributed storage system that has been proven and tested to be reliable. In addition, the Decision Tree algorithm, whose classification success is known, is preferred. When the aims of the study and its contribution to the literature are examined, it is seen that it has brought an innovation to the literature. In the next section you will find a detailed section explaining how we did the current work.

4. Proposed Model

In this section, the methods and techniques related to the blockchain structure to be used, its installation, operation, why the weight files should be stored in the distributed learning model and how they can be stored with smart contracts are explained. In the proposed model, Hyperledger Fabric is used as the blockchain infrastructure. To store the data in the weight files created by machine learning, the rough code of the smart contract created is given.

4.1. Hyperledger Fabric Setup

The Hyperledger Fabric will run on an operating system. As the operating system, the Linux-based Ubuntu 22.04.1 version was preferred. After the installation process is completed, the prerequisites for the Hyperledger Fabric infrastructure must be installed. Prerequisites are Curl, Git, Docker and Docker-Compose technologies. Installations from the Ubuntu terminal can be easily performed with codes. When the codes given below are applied in order, the prerequisites for Hyperledger Fabric installation will be completed.

- `sudo apt install curl`
- `sudo apt install git`
- `sudo apt install docker.io`
- `sudo apt install docker-compose`
- `sudo curl -sSL https://bit.ly/2ysbOFE | sudo bash -s`

Figure 2. Installation codes of Hyperledger Fabric Dependencies

After the pre-installation process, the network structure to be worked on is opened. Afterwards, the installation of channels through which communication will be carried out on this network is set up. Then, since the coding on the existing structure will be carried out with the JavaScript language, the necessary language settings are made.

- cd fabric-samples/test-network
- sudo ./network.sh up createChannel
- sudo ./network.sh deployCC -ccn basic -ccp ../asset-transfer-basic/chaincode-javascript -ccl JavaScript
- sudo su
- export PATH=\${PWD}/../bin:\$PATH
- export FABRIC_CFG_PATH=\${PWD}/../config/

Figure 3. Installation codes of Hyperledger Fabric Channels

After these processes are completed, organization setups should be done. The environmental variables of the first organization are carried out by following the items below in order.

- export CORE_PEER_TLS_ENABLED=true
- export CORE_PEER_LOCALMSPID="Org1MSP"
- export CORE_PEER_TLS_ROOTCERT_FILE=\${PWD}/organizations/peerOrganizations/org1.example.com/peers/peer0.org1.example.com/tls/ca.crt
- export CORE_PEER_MSPCONFIGPATH=\${PWD}/organizations/peerOrganizations/org1.example.com/users/Admin@org1.example.com/msp
- export CORE_PEER_ADDRESS=localhost:7051

Figure 4. Configuration codes of Hyperledger Fabric

The necessary operational processes and ways for the organization are introduced.

- peer chaincode invoke -o localhost:7050 --ordererTLSHostnameOverride orderer.example.com --tls -cafile \${PWD}/organizations/ordererOrganizations/example.com/orderers/orderer.example.com/msp/tlscacerts/tlsca.example.com-cert.pem -C mychannel -n basic --peerAddresses localhost:7051 --tlsRootCertFiles \${PWD}/organizations/peerOrganizations/org1.example.com/peers/peer0.org1.example.com/tls/ca.crt --peerAddresses localhost:9051 --tlsRootCertFiles
- \${PWD}/organizations/peerOrganizations/org2.example.com/peers/peer0.org2.example.com/tls/ca.crt -c '{"function":"InitLedger","Args":[]}'
- peer chaincode query -C mychannel -n basic -c '{"Args":["GetAllAssets"]}'

Figure 5. Introduction of operational processes and pathways required for Hyperledger Fabric Organization

The same processes are carried out for the second organization. After these processes are completed, wallet definitions are made.

- export CORE_PEER_TLS_ENABLED=true
- export CORE_PEER_LOCALMSPID="Org2MSP"
- export CORE_PEER_TLS_ROOTCERT_FILE=\${PWD}/organizations/peerOrganizations/org2.example.com/peers/peer0.org2.example.com/tls/ca.crt
- export CORE_PEER_MSPCONFIGPATH=\${PWD}/organizations/peerOrganizations/org2.example.com/users/Admin@org2.example.com/msp
- export CORE_PEER_ADDRESS=localhost:9051
- peer chaincode query -C mychannel -n basic -c '{"Args":["ReadAsset","asset6"]}'
- peer chaincode invoke -o localhost:7050 --ordererTLSHostnameOverride orderer.example.com --tls -cafile \${PWD}/organizations/ordererOrganizations/example.com/orderers/orderer.example.com/msp/tlscacerts/tlsca.example.com-cert.pem -C mychannel -n basic --peerAddresses localhost:7051 --tlsRootCertFiles \${PWD}/organizations/peerOrganizations/org1.example.com/peers/peer0.org1.example.com/tls/ca.crt --peerAddresses localhost:9051 --tlsRootCertFiles \${PWD}/organizations/peerOrganizations/org2.example.com/peers/peer0.org2.example.com/tls/ca.crt -c '{"function":"CreateAsset1","Args":["asset7","192.168.1.1","45","Remzi","100"]}'

Figure 6. Wallet definitions for Hyperledger Fabric Organization

With the following installation codes, Nodejs and npm installations are completed and Hyperledger Fabric is ready to work.

- apt install nodejs
- apt install npm

Figure 7. Setup Nodejs and npm

There is a need to define an authority that will perform its work on the Hyperledger Fabric infrastructure. This operation can be performed with the code written in the bottom line. With the next line of code, the server is lifted.

- node setupadminuser.js
- node server.js

Figure 8. Define admin for blockchain system

If you want to reconfigure an established and functioning infrastructure or wallet, you will first need to reset the existing settings. This can get complicated. For this reason, it may be wiser to delete and reinstall. The lines of code listed below first stop the active network and then clear the wallet by deleting it.

- cd ../../test-network
- ./network.sh down
- cd ../asset-transfer-basic/application-smartcontract
- rm -r wallet

Figure 9. Delete wallet code for Hyperledger Fabric Organization

4.2. Running the Hyperledger Fabric Framework

After the installation is completed, there will be no problem in the operations you will do when you start the system. However, when the system is stopped or closed, some processes need to be repeated from the beginning due to security measures. These sequences of operations are given below, in order, in item. The process, which starts with the authorization received from the terminal, continues with the opening of the relevant files, channel installations, activation of the smart contract, identification of the authorized person, and re-starting the server.

- sudo su
- cd fabric-samples/test-network
- ./network.sh up createChannel -ca
- ./network.sh deployCC -ccn basic -ccp ../asset-transfer-basic/chaincode-smartcontract/ -ccl javascript
- cd ../asset-transfer-basic/application-smartcontract
- node setupadminuser.js
- node server.js

Figure 10. Start code for Hyperledger Fabric Organization

After these processes are completed, the wallet can be started to listen with the Ip address given in the bash files and the settings made in the contract. The records in the wallet can be tracked.

4.3. Smart Contract Structure

A smart contract is executable code running on an engineered blockchain designed to facilitate the terms of an agreement, execute, and execute transactions between parties in mutual trust issues. It can be thought of as a system that allows digital asset transactions to all or some of the relevant parties after the predefined rules in smart contracts are fulfilled by the parties. Compared to traditional contracts, smart contracts do not allow a trusted third party to operate, resulting in low transaction costs. Prepared smart contracts will be assigned to a unique 20-byte address. Once the smart contract is paired with a blockchain, the code assigned to the contract cannot be changed. For a contract to be executed, it is sufficient for users to send the transaction they want to perform to the address of the contract. The requested transaction is then evaluated by each consensus node in the network to arrive

at a consensus. The status of the contract will then be updated according to the result [30]. The consensus algorithms used, along with variables such as throughput, latency, node scalability, largely determine the performance of the distributed system for blockchains.

Algorithm 1 Smart Contract Pseudo Code

```

1: function initLedger ()
2:   config LedgerStandarts ()
3: function CreateAsset (ctx, params) ←obj
4:   if exist (ctx) == true then
5:     return error
6:   else
7:     return (obj ∩ [params])
8: function GetAllAsset (ctx, id)
9:   const allResult = []
10:  while! result. done then
11:    allResult.Push → Key: result.value.key, Record: record
12:  result ← await. iterator. next ()
13:  return allResult end

```

Figure 11. Smart contract pseudo code

In the prepared smart contract, the initLedger method is run to perform the initial settings that must be made at the beginning of the ledger. Before writing new data to the notebook, it is checked whether there is data with the same id. When a positive response is received, a new object is created and the ledger registration process is started, and a new record is returned at the end of the transaction. The GetAllAsset method can be run to read the records. After the necessary permissions are checked, the data recorded in the ledger can be read and listed with the help of an iterator. Figure 11 shows the pseudocode of the created smart contract.

The Hyperledger Fabric infrastructure uses Raft, a consensus mechanism based on Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) as a consensus algorithm. Raft is a consensus algorithm that works by participants in the network electing a leader and approving blocks proposed by the leader. Raft is a consensus mechanism that requires most participants in the network to agree. In this way, transactions continue even when there are problems between some participants in the network. Raft focuses on delivering a higher transaction speed and lower latency.

4.4. Decision Tree Model

Decision trees are an easy and interpretable algorithm from supervised learning algorithms. Regression and classification operations can be performed with the decision tree algorithm. The algorithm works in the inductive structure. In a developed decision tree algorithm, it is very effective in defining a method that resembles a tree and its branches to pass the data set and to achieve the expected results from the data set. The branches in the tree structure are based on the values of the input parameters and are divided depending on the value of a particular property.

The information acquisition attribute minimizes the information required to classify the data points into the relevant segments, thus ensuring the least randomness in that segment. Knowledge gain is calculated with the formulas shown in Equation (1) and Equation (2).

$$Info(D) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

$$Info_A(D) = \sum_{j=1}^v \frac{|D_j|}{|D|} x Info_{(D_j)} \quad (2)$$

p_i is the probability that a random tuple in dataset D belongs to a class. $Info(D)$ is the average amount of information required to define the class, category of a data point in D . m and is the amount of data to be retrieved. In most cases, the binary function is used since the information is encoded in bits. $Info(D)$ is also known as the entropy of dataset D . Equation (3) is used to calculate the information gain.

$$Gain(A) = Info(D) - Info_A(D) \quad (3)$$

The information gain measure is used to select attributes with many values. Earnings ratios are processes for improving results. It is calculated by the formula shown in Equation (5).

$$SplitInfo_A(D) = - \sum_{j=1}^v \frac{|D_j|}{D} \times \log_2 \left(\frac{|D_j|}{|D|} \right) \quad (4)$$

$$GainRatio(A) = \frac{GainRatio(A)}{SplitInfo(A)} \quad (5)$$

The Gini index considers a binary split for each attribute. No matter how many values an input parameter has, possible subsets that can occur are formed by grouping binary pairs. This situation is calculated with the formula shown in Equation (6).

$$Gini_A(D) = \frac{|D_1|}{D} Gini(D_1) + \frac{|D_2|}{D} Gini(D_2) \quad (6)$$

When a decision tree is built, most of the branches will reflect anomalies in the training data due to noise or outliers. Small changes in values can cause completely different results. Various methods are used to eliminate this inconsistency caused by overfitting. Tree pruning is a method that typically uses statistical measurements to remove the least reliable branches or branches supported by a few samples. Pruned trees tend to be smaller and less complex and therefore easier to understand. They are also often faster and better at accurately classifying independent test data. The pruning is carried out by the method shown in Equation (7).

$$\Delta Gini(A) = Gini(D) - Gini_A(D) \quad (7)$$

The above-mentioned mathematical models can be coded in Python using the necessary libraries. Pseudo codes of the codes performed for the necessary operations are shown in Figure 3 and Figure 4.

Algorithm 2 Decision_Tree_Classifier Pseudo Code

```

1: Import libraries
2: Load dataset ()
3:   Split dataset (Input Values)
4:   Split dataset (Output Values)
5: function Create Model (params) ← values
6: function Model. Fit (entropy, depth)
7: dump (model, "destination.h5")

```

Figure 12. Decision Tree pseudo code

A model is developed with the code, decision trees algorithm shown in Figure 12, and the developed model is saved. Thanks to this recording process, the trained model can be shared with the desired point. When this sharing is realized, the node that will use the model can directly use the ready model without having training data.

Algorithm 3 Model_Client_Using Pseudo Code

```

1: Import libraries
2: Model_Load ("destination.h5")
3: Test_data = numpy. Array ("Input Values")
4: Result = Model.Classify ("Test_data")
5: Print (Result)

```

Figure 13. Client model pseudo code

Figure 4 shows the structured code block to directly use a trained model. Structures at the nodes will be able to use the model directly without entering the training process by using this code block. This will save on the training process.

The model success obtained by collecting and training the data belonging to its own region, which is one of the critical points of the study, remains the local model, while the model that is collected and trained from all regions is described as a global model. Thanks to the code seen in Figure 13, local models will be able to serve as global models.

5. Findings

In this study, the data set containing the Air Pollution Measurement Information of the city of Seoul, Korea was used. This dataset contains air pollution measurement information and result information for 25 different districts of Seoul city. The dataset is open sourced on the Kaggle dataset platform with license number CC BY-SA 4.0. Air pollution values obtained in certain regions vary between certain limits. The values obtained in this region were filtered from the entire data set and a data set specific to these regions was created. Afterwards, these regions were trained with the values obtained in their own regions and the model was recorded. When this model is tested with the data obtained in its own fields, it shows very successful results. However, when tested with data obtained from different regions and dissimilar to these regions, the model classification success is very low. To provide this information, we have listed the test results we performed in Table 3. In Table 3, SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀, PM₂₅ data in the data set are shown to the model as input values. It is the classification of one of the "Good", "Normal", "Bad", "Very Bad" results determined as the expected output values from the model. Each of the output values is expressed with different colors in Table 2. In the results section, the classification value of the developed model and the actual result value are shown.

Table2. Model success and error status tested with values obtained from different fields

INPUT VALUES						OUTPUT VALUES				RESULTS	
SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	PM ₁₀	PM ₂₅	Good	Normal	Bad	Very Bad	Model Result	Actual Result
3.736	38.445	12.455	0,4	35	17	1	2	3	4	2	4
0,276	0,135	0,031	26,9	985	985	1	2	3	4	3	4
0,095	0,006	0,007	10,7	985	985	1	2	3	4	2	4
0,194	0,002	0,188	16,9	57	50	1	2	3	4	2	4
0,106	0,01	0,084	2,2	1985	985	1	2	3	4	2	4
0,134	0,063	0,059	13,3	171	178	1	2	3	4	3	4
0,112	0,005	0,006	11,9	985	985	1	2	3	4	2	4
0,121	0,006	0,027	12,1	985	985	1	2	3	4	2	4
0,104	0,008	0,045	3,7	622	610	1	2	3	4	2	4
0,266	0,002	0,125	27,8	268	263	1	2	3	4	2	4
0,007	0,074	0,003	1,4	122	102	1	2	3	4	3	3
0,006	0,07	0,003	1,5	122	103	1	2	3	4	3	3
0,005	0,028	0,031	0,9	146	111	1	2	3	4	2	2
0,005	0,019	0,041	0,9	145	114	1	2	3	4	2	2
0,004	0,039	0,013	0,5	22	10	1	2	3	4	1	1
0,004	0,034	0,018	0,4	22	7	1	2	3	4	1	1
0,005	0,033	0,019	0,4	19	9	1	2	3	4	1	1
0,004	0,035	0,017	0,5	19	15	1	2	3	4	2	2
0,004	0,041	0,014	0,5	25	13	1	2	3	4	1	1

The result value predicted by the model and the actual value are expressed with the colors in the output values columns in the Table 2. In these test results of an accurate and sufficiently advanced global model, the actual values column and the predicted values column would be expected to have the same colors. However, it is seen in Table 2 that there is a failed model in all the test data it encounters, except for the data in which it is trained.

The success rate in the training, which was made by collecting all the data in the data set, was determined as 98.87%. In addition, the error matrix obtained in the test processes performed with the

model at the end of the training is shown in Figure 14/a. According to this error matrix, 99.25% accuracy is obtained in the data that will be included in the “Good” class, while there is a 0.47% margin of error. While 98.69% accuracy is achieved in the data that will be included in the “Normal” class, there is a 1.31% margin of error. Data that will be included in the “Bad” class has an accuracy of 99.61% and a margin of error of 0.39%. The data to be included in the “Very Bad” class has 66% accuracy and 34% margin of error.

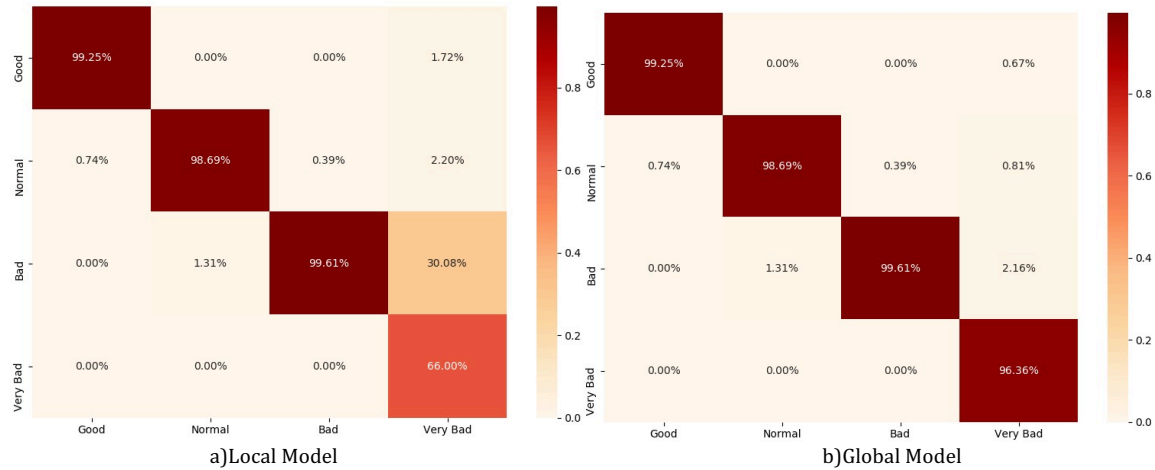


Figure 14. Confusion matrix for decision tree algorithm

The error matrix values obtained from sharing the model with the system stakeholders after the data were combined under a single roof and the training was carried out in a single center are shown in Figure 14/b. These results ensure that the distributed learning model is limited to serving a specific region and is a global model. In addition, it is seen that the success achieved with the global model has reached quite high values compared to the previous value. The model success, which showed 66% accuracy, reached 96.36%.

To determine the time taken to save data to the blockchain structure created in another module of the study, performance measurement was carried out with different parameters. The obtained value is given graphically in Figure 15. Different scenario situations were used in the creation of the graph obtained in Figure 15. According to this scenario situation, the desired amount of work per unit time, that is, the throughput value, was changed and the measurement was made by running 10 different threads for 20 seconds. Throughput times gradually increased from 25 to 400. In the column on the right side of the graph, each throughput value is represented by a color and in the body of the graph it is indicated by this color. Each measurement was increased by 25 units. The final measurement value has been increased by 100 units. Average delay times in measurement processes, number of requests and error percentages encountered during the process were recorded.

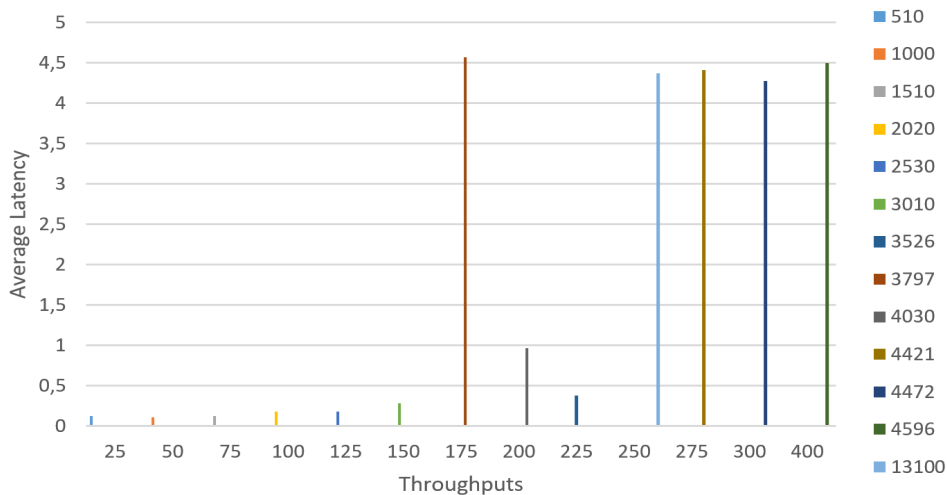


Figure 15. Blockchain performance evaluation

While recording data to the blockchain structure, an abnormal increase was noticed in the average delay time of the measurement, where the value throughout was set to 175. When the reason for this was investigated, it was determined that the connection with the blockchain server was broken during this test and an attempt was made to reconnect. The reason why the average delay time is abnormal can be verified from the graph showing the error value shown in Figure 16. This abnormality is also partially present in the test where the throughput value is set to 200. Similarly, it can be verified from the graph that the error value shown in Figure 126 is found. In addition, if the throughput value is set to 250 or more, it is seen that the delay time of the system starts to increase suddenly. This shows that the blockchain structure is approaching the upper limits of performance. When the graphs in Figure 15 and Figure 16 are examined together, it has been determined that the recording processes of the data started to be queued after the throughput value was set to 400. This data determines the upper limit of the system's performance.

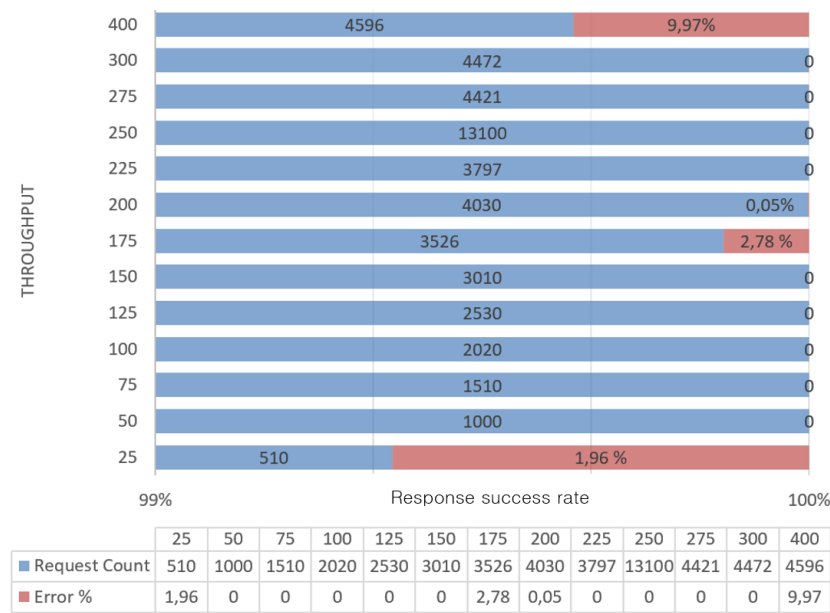


Figure 16. Different throughput values for the percentage values of the error

The number of requests made according to different throughput values and the percentage values of the error rates encountered are shown in Figure 16 in graphic and tabular form. The number of requests made varies between 510 and 13100 in response to the throughput values that change gradually between 25-400. On the other hand, error percentages vary between 1.96% and 9.97%. When the error rates are examined, an error rate of 1.96% was encountered when the first record was tried to be created. The reason for this error is recorded as no response from the server. As soon as the data record requests are started, it is thought that the record requests are unanswered, and an error is made because the blockchain structure raises the ledger structure for the first record and performs the verification of the source from which the data comes from. In addition, small error values were observed when the throughput value was 175 and 200. The reason for this error is recorded in the records as the connection with the server was lost, so no response could be received, and the connection was reset again. Although no error message is encountered for the last measurement criterion, 400 throughputs, the reason why it is passed as an error is because the recording speed is higher than the system performance. It is thought that the error rate is high because some records are queued and held. This measurement value shows the performance upper limit of the constructed blockchain system.

The blockchain's average latency and throughput information can help to make some security interpretations. The latency of a blockchain network represents how long it takes for transactions to propagate through the network and be verified. Faster latency means that transactions are confirmed faster, and the network runs faster. This means that users can process transactions faster and the network can operate more efficiently. In terms of security, fast latency makes it less likely for attackers to manipulate transactions or carry out attacks such as double spending. Throughput refers to the number of transactions that a blockchain network can process in each period. High throughput means that the network can process more transactions at the same time and run faster. This means that the

network can scale better and operate efficiently to meet user demands. From a security perspective, high throughput values make it harder for attackers to force the network to congest or degrade the network's performance.

The Hyperledger Fabric infrastructure is an open-source platform that provides secure and scalable blockchain solutions between its users. Security is a key feature of Hyperledger Fabric. It executes different security mechanisms within itself. Hyperledger Fabric enables users to securely execute transactions on the network through authentication processes and authorization mechanisms. Each participant on the network is given a unique digital identity and transaction ownership is verified by using this identity in transactions. It provides transaction-level privacy through private channels and smart contracts to protect the confidentiality of transaction data. This means that only interested parties can see the transaction data, making it inaccessible to other participants in the network. Participants on the network provide secure communication between themselves using their digital certificates. Provides role-based access control between users. This enables participants to define the roles and permissions required to perform certain operations. In this way, only participants with the relevant permissions can perform operations for which they are authorized. Smart contracts include various security controls and validation mechanisms to prevent unauthorized access and attacks from any part of the code. Hyperledger Fabric includes security controls and algorithms to detect and prevent attacks on the network. When attacks are detected, notifications are sent to network administrators and appropriate actions are taken.

6. Conclusions

In this study, a data set containing air pollution information collected from different locations was used. To serve the purpose of the study, the values obtained from similar regions in the data set were filtered from the entire data set and a dataset specific to these regions was created. With this dataset, model training was carried out for the classification process using the DT algorithm. Testing of the trained model was carried out with heterogeneous data from the entire data set. The success rate of the obtained result is not at the desired level. In this situation, a distributed learning solution was applied by considering data privacy and data security principles. In this solution, the model can be saved and transmitted to different nodes via smart contracts prepared in the Hyperledger Fabric infrastructure. After this process was performed, it was retested on the same nodes with heterogeneous data from the entire data set, and the success rates increased significantly and ranged from 98% to 99%. To perform the performance tests of the proposed system, different scenarios were constructed, and measurements were made. According to this scenario, the required amount of work per unit time, that is, the throughput value, was changed and 10 different threads were run for 20 seconds, and the throughput times were gradually increased between 25 and 400, and measurements were made. According to the results obtained, process performance and error rates were obtained at the desired level.

In future studies for the implementation of this system, it is aimed to secure and automate the air-conditioning processes of greenhouses located in different locations. In the targeted future study, it is planned to develop an IoT member capable of collecting data from the environment in real time and managing air conditioning systems. Machine learning method and blockchain platform setup will be realized with the inspiration obtained from this study.

Acknowledgment

The study was supported by Süleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit with project number FDK-2022-8719. We would like to thank Süleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit for their support.

This article was produced from the first author's doctoral thesis, "Blokzincir Tabanlı Dağıtık Öğrenme Modelleri İçin Hesaplama Altyapılarının Gerçekleştirilmesi", which was accepted at Süleyman Demirel University, Institute of Science and Technology.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] O. Güler and S. Savaş, "All aspects of metaverse studies, technologies and future," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 292–319, Sep. 2022. doi:10.30855/gmbd.0705011
- [2] E. A. Çubukçu, V. Demir and M. F. Sevimli, "Estimating streamflow data with machine learning techniques," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 257–272, Sep. 2022. doi:10.30855/gmbd.0705009
- [3] K. Yang, T. Jiang, Y. Shi, and Z. Ding, "Federated learning via over-the-air computation," *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 19, no. 3, pp. 2022–2035, Mar. 2020. doi:10.1109/TWC.2019.2961673
- [4] T. Li, A. K. Sahu, A. Talwalkar, and V. Smith, "Federated learning: challenges, methods, and future directions," *IEEE Signal Process Mag*, vol. 37, no. 3, pp. 50–60, May 2020. doi:10.1109/MSP.2020.2975749
- [5] Cao, X., Başar, T., Diggavi, S., Eldar, Y. C., Letaief, K. B., Poor, H. V., & Zhang, J. ., "Communication-efficient distributed learning: an overview," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 4, pp. 851–873, Apr. 2023. doi:10.1109/JSAAC.2023.3242710
- [6] Li, Q., Wen, Z., Wu, Z., Hu, S., Wang, N., Li, Y., Liu, X., He, B., "A survey on federated learning systems: vision, hype and reality for data privacy and protection," *IEEE Trans Knowl Data Eng*, Apr. 2021. doi:10.1109/TKDE.2021.3124599
- [7] C. Zhang, Y. Xie, H. Bai, B. Yu, W. Li, and Y. Gao, "A survey on federated learning," *Knowl Based Syst*, vol. 216, p. 106775, Mar. 2021. doi:10.1016/J.KNOSYS.2021.106775
- [8] J. P. Albrecht, "How the GDPR Will Change the World," *European Data Protection Law Review (EDPL)*, vol. 2, 2016, Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: <https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/edpl2&id=313&div=&collection=>
- [9] X. Wang, W. Qin, F. Jiao, L. Dong, J. Guo, J. Zhang and C. Yang, "Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 32, no. 7, pp. 2318–2338, Jul. 2022. doi:10.1016/S1003-6326(22)65950-8
- [10] S. Raschka, "MLxtend: Providing machine learning and data science utilities and extensions to Python's scientific computing stack," *J Open Source Softw*, vol. 3, no. 24, p. 638, Apr. 2018. doi:10.21105/joss.00638
- [11] A. Gaier and D. Ha, "Weight agnostic neural networks," *Adv Neural Inf Process Syst*, vol. 32, 2019, Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: <https://weightagnostic.github.io/>
- [12] E. Tijan, S. Aksentjević, K. Ivanić and M. Jardas, "Blockchain technology implementation in logistics," *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 1185*, vol. 11, no. 4, p. 1185, Feb. 2019. doi:10.3390/SU11041185
- [13] J. Golosova and A. Romanovs, "The advantages and disadvantages of the blockchain technology," *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2018 - Proceedings*, Dec. 2018. doi:10.1109/AIEEE.2018.8592253
- [14] Z. Fauziah, H. Latifah, X. Omar, A. Khoirunisa and S. Millah, "Application of blockchain technology in smart contracts: a systematic literature review," *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, vol. 2, no. 2, pp. 160–166, Aug. 2020. doi:10.34306/ATT.V2I2.97
- [15] "A Blockchain Platform for the Enterprise — hyperledger-fabricdocs main documentation." <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/> (accessed Jun. 20, 2023).
- [16] "Blockchain Technology Projects – Hyperledger Foundation." <https://www.hyperledger.org/use> (accessed Jun. 20, 2023).
- [17] Q. Nasir, I. A. Qasse, M. Abu Talib and A. B. Nassif, "Performance analysis of hyperledger fabric platforms," *Security and Communication Networks*, vol. 2018, 2018. doi:10.1155/2018/3976093
- [18] S. Tanwar, Q. Bhatia, P. Patel, A. Kumari, P. K. Singh and W. C. Hong, "Machine learning adoption in blockchain-based smart applications: the challenges, and a way forward," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 474–448, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2019.2961372
- [19] Y. Liu, F. R. Yu, X. Li, H. Ji and V. C. M. Leung, "Blockchain and machine learning for communications and networking systems," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 1392–1431, Apr. 2020. doi:10.1109/COMST.2020.2975911
- [20] A. Adhikari, D. B. Rawat and M. Song, "Wireless network virtualization by leveraging blockchain technology and machine learning," *WiseML 2019 - Proceedings of the 2019 ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning*, pp. 61–66, May 2019. doi:10.1145/3324921.3328790
- [21] R. Shinde, O. Nilakhe, P. Pondkule, D. Karche and P. Shendage, "Enhanced Road Construction Process with Machine Learning and Blockchain Technology," *2020 International Conference on Industry 4.0 Technology, I4Tech 2020*, pp. 207–210, Feb. 2020.

doi:10.1109/I4TECH48345.2020.9102669

[22] M. U. Nasir, S. Khan, S. Mehmood, M. A. Khan, M. Zubair and S. O. Hwang, "Network meddling detection using machine learning empowered with blockchain technology," *Sensors 2022, Vol. 22, Page 6755*, vol. 22, no. 18, p. 6755, Sep. 2022. doi:10.3390/S22186755

[23] T. Wang, "A unified analytical framework for trustable machine learning and automation running with blockchain," *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2018*, pp. 4974–4983, Jan. 2019. doi:10.1109/BIGDATA.2018.8622262

[24] Z. A. El Houda, A. Hafid and L. Khoukhi, "BrainChain - A machine learning approach for protecting blockchain applications using SDN," *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2020-June, Jun. 2020. doi:10.1109/ICC40277.2020.9148808

[25] W. Xiong and L. Xiong, "Smart contract based data trading mode using blockchain and machine learning," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102331–102344, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2928325

[26] Z. Shahbazi and Y. C. Byun, "Improving transactional data system based on an edge computing–blockchain–machine learning integrated framework," *Processes 2021, Vol. 9, Page 92*, vol. 9, no. 1, p. 92, Jan. 2021. doi:10.3390/PR9010092

[27] N. V. Pardakhe and V. M. Deshmukh, "Machine learning and blockchain techniques used in healthcare system," *2019 IEEE Pune Section International Conference, PuneCon 2019*, Dec. 2019. doi:10.1109/PUNECON46936.2019.9105710

[28] Khan, M. A., Abbas, S., Rehman, A., Saeed, Y., Zeb, A., Uddin, M. I., Nasser, N., Ali, A, "A machine learning approach for blockchain-based smart home networks security," *IEEE Netw*, vol. 35, no. 3, pp. 223–229, May 2021. doi:10.1109/MNET.011.2000514

[29] F. Jamil, H. K. Kahng, S. Kim and D. H. Kim, "Towards secure fitness framework based on iot-enabled blockchain network integrated with machine learning algorithms," *Sensors 2021, Vol. 21, Page 1640*, vol. 21, no. 5, p. 1640, Feb. 2021. doi:10.3390/S21051640

[30] Uddin, M., Memon, M. S., Memon, I., Ali, I., Memon, J., Abdelhaq, M., & Alsaqour, R., "Hyperledger fabric blockchain: secure and efficient solution for electronic health records," *Computers, Materials & Continua*, vol. 68, no. 2, pp. 2377–2397, 2021. doi:10.32604/cmc.2021.015354

[31] F. P. Oikonomou, J. Ribeiro, G. Mantas, J. M. C. S. Bastos and J. Rodriguez, "A hyperledger fabric-based blockchain architecture to secure iot-based health monitoring systems," *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking, MeditCom 2021*, pp. 186–190, 2021. doi:10.1109/MEDITCOM49071.2021.9647521

[32] N. Lu, Y. Zhang, W. Shi, S. Kumari and K. K. R. Choo, "A secure and scalable data integrity auditing scheme based on hyperledger fabric," *Comput Secur*, vol. 92, p. 101741, May 2020. doi:10.1016/J.COSE.2020.101741

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Vibration Behaviors of Antisymmetric Fiber Metal Laminated Composite Plates

Sinan Maraş^a, Mustafa Yaman^b

Submitted: 18.12.2022 Revised: 21.06.2023 Accepted: 19.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705069

ABSTRACT

Keywords: Differential quadrature methods, fiber metal laminated composite, vibration analysis

^{a*} Ondokuz Mayıs University,
Engineering Faculty,
Dept. of Mechanical Engineering
55139 - Samsun, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2651-374X
e mail: sinan.maras@omu.edu.tr

^b Atatürk University,
Engineering Faculty,
Dept. of Mechanical Engineering
25240 - Erzurum, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6929-8058

*Corresponding author:
sinan.maras@omu.edu.tr

In this study, free vibration analysis of Fiber Metal Laminated (FML) composite was performed numerically. The FMLs are hybrid structures composed of fiber-reinforced polymer composites such as carbon/epoxy (CARALL), glass/epoxy (GLARE), or aramid/epoxy (ARALL) with aluminum sheets. The vibration parameters of the FML composite structures modeled by differential quadrature (DQ) methods have been determined. The natural frequencies obtained to prove the accuracy of the model are compared with the results obtained by experimental method. The effects of the change in the orientation angles of the antisymmetric carbon and glass fibers on the in-plane vibration properties of the FML plates under various boundary conditions were numerically investigated. It was concluded that the first natural frequency value of CARALL composite is 297.62 Hz, while the GLARE composite has a value of 236.59 Hz for the same boundary condition and configuration cases. Furthermore, it has been obtained that the natural frequency value of the hybrid layer sequence Al/C/G/C/Al is 278.49 Hz, and it is higher than the natural frequency value of 254.46 Hz for the sequence Al/G/C/G/Al. Another significant outcome of the research is that the highest natural frequencies were obtained in the CCCC boundary condition in all FMLs.

Antisimetrik Fiber Metal Laminat Plakaların Titreşim Davranışları

ÖZ

Bu çalışmada, Fiber Metal Laminat (FML) kompozit malzemenin serbest titreşim analizi sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. FML'ler, karbon/epoksi (CARALL), cam/epoksi (GLARE) veya aramid/epoksi (ARALL) gibi fiber takviyeli polimer kompozitlerden oluşan ve alüminyum levhalarla desteklenen hibrit yapılar olarak tanımlanmaktadır. Diferansiyel kuadratür (DQ) yöntemiyle modellenen FML kompozit yapıların titreşim parametreleri belirlenmiştir. Modelin doğruluğunu kanıtlamak için elde edilen doğal frekanslar deneysel yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Antisimetrik karbon ve cam fiberlerinin yönelme açılarının FML levhalarının düzlem içi titreşim özellikleri üzerindeki etkisi çeşitli sınır koşulları altında sayısal olarak incelenmiştir. Aynı sınır koşulu ve konfigürasyon durumları için CARALL kompozitin birinci doğal frekans değeri 297.62 Hz olarak bulunmuştur, GLARE kompozitin ise doğal frekans değeri 236.59 Hz olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Al/C/G/C/Al gibi hibrit tabaka dizilimine sahip FML'nin doğal frekans değeri 278.49 Hz olarak elde edilmiştir ve bu değer, Al/G/C/G/Al dizilimi için elde edilen 254.46 Hz doğal frekans değerinden daha yüksektir. Araştırmanın bir diğer önemli sonucu, tüm FML'lerde en yüksek doğal frekanslar CCCC sınır koşulunda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler:

Diferansiyel kareleme yöntemleri, fiber metal laminat kompozit, titreşim analizi

1. Introduction

Fiber Metal Laminates (FML) are commonly utilized especially in aircraft, aerospace and automobile industries due to their superior properties such as fatigue resistance, fatigue strength, corrosion resistance, fracture toughness and density compared to conventional materials. Since these composites are in demand in various industries, it is necessary to determine their dynamic and mechanical properties. The studies on free vibration analysis of FML composites are very limited in the literature. In these studies, the equations of motion of FML beam, plate and shell elements are generally derived using first-order (FSDT) or higher-order (HSDT) shear deformation theory. The equations have been solved by various numerical methods such as Galerkin, Rayleigh-Ritz, Finite Element method, and experimental studies have been carried out and the results have been evaluated. The effects of layer thickness, fiber orientation, boundary conditions and plate aspect ratio on vibration characteristics were investigated [1-10].

Apart from linear analyses, nonlinear vibration behaviors of these structures were also investigated. The nonlinear equations of motion of the FML plates can be obtained using the FSDT. These equations obtained to determine the nonlinear frequencies of the system can be solved using a numerical method for instance Galerkin, multiple time scale methods [11, 12].

The use of the DQ method, which is one of the numerical methods that enables to achieve results with acceptable sensitivity by using fewer elements and therefore less nodes, in the vibration behaviors of the composite beam, plate and shell elements has been quite high in recent years. From the literature survey, it is found that there are only few studies on the free vibration analysis of the FML beams and plates using DQ methods. Among these studies, Maraş and Yaman [10] used DQ methods to analyze the vibration behaviors of FML composite plates. In other studies, especially circular plate and Timoshenko beam structures have been investigated analytically and numerically [13-15].

As a result of the literature review, it has been determined that the vibration behavior of FMLs with the DQ method is not much in the published literature. It was concluded that anti-symmetric laminates were not examined in these studies. In terms of contributing to the literature in this study, the effects of anti-symmetric laminates and boundary conditions on the free vibration analysis of the FML composites were examined numerically using the DQ methods.

2. Procedure For DQ Method

The DQ method, which is one of the numerical method, gives results with acceptable precision by using less number of nodes, was introduced by Bellman and it was stated that fast and susceptible solutions of partial differential equations can be obtained in initial and boundary value problems [16]. To calculate the partial derivative of a given discrete point of a function with respect to a given space variable using the DQ method, it is necessary to find the weighted linear sum of the function values at all discrete points of that variable region [17].

For two-dimensional problems, the number of nodes in the x-direction and in the y-direction can be represented by the symbols N_x and N_y , respectively. For the discrete points (x_i, y_j) of the $u(x,y)$ function, the derivative expression of the r th order with respect to x , the derivative expression of the s th order with respect to y and the derivative expressions of the $(r+s)$ th order with respect to x and y are as follows, respectively;

$$\left. \frac{\partial^r u}{\partial x^r} \right|_{x=x_i} = \sum_{k=1}^{N_x} A_{ik}^{(r)} u(x_k, y_j) \quad r = 1, 2, \dots, N_x - 1 \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial^s u}{\partial y^s} \right|_{y=y_j} = \sum_{k=1}^{N_y} B_{jk}^{(s)} u(x_i, y_k) \quad s = 1, 2, \dots, N_y - 1 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial^{(r+s)} u}{\partial x^r \partial y^s} \right|_{x_i y_j} = \frac{\partial^r}{\partial x^r} \left(\frac{\partial^s u}{\partial y^s} \right)_{x_i y_j} = \sum_{k=1}^{N_x} A_{ik}^{(r)} \sum_{m=1}^{N_y} B_{jm}^{(s)} u(x_k, y_m) \quad (3)$$

$i=1, 2, \dots, N_x$ ve $j=1, 2, \dots, N_y$

The expressions $A_{ij}^{(r)}$ and $B_{ij}^{(s)}$ are the weighting coefficients of the derivative expressions for the r 'th and s 'th

order x_i and y_j discrete points of the $u(x,y)$ function [18]. The weighting coefficients are obtained with the following expressions.

$$A_{ij}^{(r)} = r \left[A_{ii}^{(r-1)} A_{ij}^{(1)} - \frac{A_{ij}^{(r-1)}}{x_i - x_j} \right]; \quad i,j=1,2,\dots,N_x, \quad r=2,3,\dots,N_x-1 \quad (4)$$

$$B_{ij}^{(s)} = s \left[B_{ii}^{(s-1)} B_{ij}^{(1)} - \frac{A_{ij}^{(s-1)}}{y_i - y_j} \right]; \quad i,j=1,2,\dots,N_y, \quad s=2,3,\dots,N_y-1 \quad (5)$$

$$A_{ii}^{(r)} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_x} A_{ij}^{(r)}; \quad i=1,2,\dots,N_x, \quad r=1,2,\dots,N_x-1 \quad (6)$$

$$B_{ii}^{(s)} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_y} B_{ij}^{(s)}; \quad i=1,2,\dots,N_y, \quad s=1,2,\dots,N_y-1 \quad (7)$$

The relations giving the nodal point selection in x and y coordinates are as follows;

$$X_i = \frac{i-1}{N_x-1}; \quad i=1,2,\dots,N_x \quad (8)$$

$$Y_j = \frac{j-1}{N_y-1}; \quad i=1,2,\dots,N_y \quad (9)$$

In this study, the equation expressing the bending vibration of a symmetric thin-layer composite plate according to the classical plate theory is discussed. For more details on the mathematical properties of the governing equation, including its derivation and scientific applications, the interested reader may refer to [19, 20].

The DQ analogs of the vibration expression equation for inner nodes are defined as:

$$\begin{aligned} D_{11} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(4)} \bar{w}_{kl} + 4D_{16} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(3)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(2)} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{jk} \\ + 4D_{26} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(3)} \bar{w}_{jk} + D_{22} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(4)} \bar{w}_{lk} = \rho h \omega^2 w_{il} \end{aligned} \quad (10)$$

$(i = 2,3, \dots, n_y - 1; l = 2,3, \dots, n_x - 1)$

where, the expressions $a_{ij}^{(1)}$, $a_{ij}^{(2)}$, $a_{ij}^{(3)}$, $a_{ij}^{(4)}$ show the weighting coefficients according to x from the first order to the fourth order, respectively. Similarly, the weighting coefficients in the y direction from the first order to the fourth order are $b_{ij}^{(1)}$, $b_{ij}^{(2)}$, $b_{ij}^{(3)}$ and $b_{ij}^{(4)}$, respectively. Also, n_x and n_y represent the total number of nodes in the x and y direction, respectively.

The DQ notations of boundary condition can be written similarly. The bending moment equations are exercised to the following partial differential derivatives: $(\partial w / \partial x)_{x=0}$ and $(\partial w / \partial x)_{x=c}$

$$\begin{aligned} D_{11} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(2)} \bar{w}_{kl} + D_{12} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{lk} + 2D_{16} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} = (M_x)_{il} \end{aligned} \quad (11)$$

$(i = 1,2, \dots, n_y; l = 1, n_x)$

The shear force equations are placed where the displacement expression (w) is located. The DQ equations of the boundary condition expressions are as follows:

$$\begin{aligned} D_{11} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(3)} \bar{w}_{kl} + 4D_{16} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(2)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} + (D_{12} + 4D_{66}) \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{jk} \\ + 2D_{26} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(3)} \bar{w}_{lk} = (V_x)_{il} \quad (i = 2,3, \dots, n_y - 1; l = 1, n_x) \end{aligned} \quad (12)$$

The equation (12) does not include the four corner points $(w_{il} (i = 1, n_y; l = 1, n_x))$.

Similarly, the DQ equations for the $(\partial w/\partial y)_{y=0}$ and $(\partial w/\partial y)_{y=d}$ cases are:

$$D_{12} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(2)} \bar{w}_{kl} + D_{22} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{ik} + 2D_{26} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} = (M_y)_{il} \quad (13)$$

$$(i = 1, n_y; l = 1, 2, \dots, n_x)$$

The DQ analog of shear force expression for the y coordinate can be given as follows, the equation does not include the four corner points $(w_{il} (i = 1, n_y; l = 1, n_x))$.

$$D_{22} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(3)} \bar{w}_{ik} + 4D_{26} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{jk} + (D_{12} + 4D_{66}) \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(2)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} + 2D_{16} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(3)} \bar{w}_{kl} = (V_y)_{il} \quad (14)$$

$$(i = 1, n_y; l = 2, 3, \dots, n_x - 1)$$

Finally, the following DQ equations are applied at the four vertices $(w_{il} (i = 1, n_y; l = 1, n_x))$:

$$2D_{16} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ik}^{(2)} \bar{w}_{kl} + 2D_{26} \sum_{k=1}^{n+2} b_{lk}^{(2)} \bar{w}_{ik} + 4D_{66} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{k=1}^{n+2} a_{ij}^{(1)} b_{lk}^{(1)} \bar{w}_{jk} = R_{il} \quad (15)$$

$$(i = 1, n_y; l = 1, n_x)$$

All equations between equation (10) and equation (15) can be written in matrix form after performing the necessary mathematical operations.

$$\begin{bmatrix} K_{ee} & K_{ei} \\ K_{ie} & K_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta_e\} \\ \{w_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \lambda[I]\{w_i\} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

The DQ analogs of the differential equation at the boundary points and all inner points are denoted by the symbols e and i, respectively. Also, the symbols $\{\Delta_e\}$, $\{w_i\}$ and $\lambda = \rho h \omega^2$ represent the displacement vector at the boundary points, the displacement vector at the inner points, and the eigenvalue expression, respectively.

After eliminating the $\{\Delta_e\}$ vector, which represents non-zero displacements, Eq. (16) can be rewritten as:

$$[K_{ii} - K_{ib} K_{bb}^{-1} K_{bi}] \{w_i\} = \lambda [I] \{w_i\} \quad (17)$$

The Equation (17) can be written in a simpler way and can be expressed as follows.

$$[\bar{K}] \{w_i\} = \lambda [I] \{w_i\} \quad (18)$$

The Equation (18) is a standard eigenvalue matrix equation and can be solved with a standard eigenvalue solver. The vector $\{w_i\}$ denoting the mode shapes can be obtained in a similar way.

3. Experimental Method

The numerical results were analogized with the experimental results to prove the accuracy and applicability of the proposed model. For this purpose, FML composite plates were produced by hot pressing method (Fig. 1). The material placed in the hot press machine was subjected to curing by heating for 2 hours at 140 °C and 20 kN force (under 5 bar pressure).



Fig. 1. FML composite plates manufactured: a) CARALL b) GLARE

The mechanical properties of the produced FML composite materials (Table 1) were obtained by applying tensile test according to ASTM D3039 standard in Shimadzu tensile machine. Then, the vibration and damping characteristics of the FML composite plates were determined using the PULSE measurement system (computer-indexed system) consisting of many measurement channels (Fig. 2).

Table 1. The mechanical properties of the materials used manufacturing the FML plates

Material	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m^3)
Carbon/epoxy	29.33	29.33	2.72	0.041	1371.4
Glass/epoxy	14.01	14.01	1.06	0.145	1627.6
Al 1050	34.00	34.00	12.78	0.330	2599.2

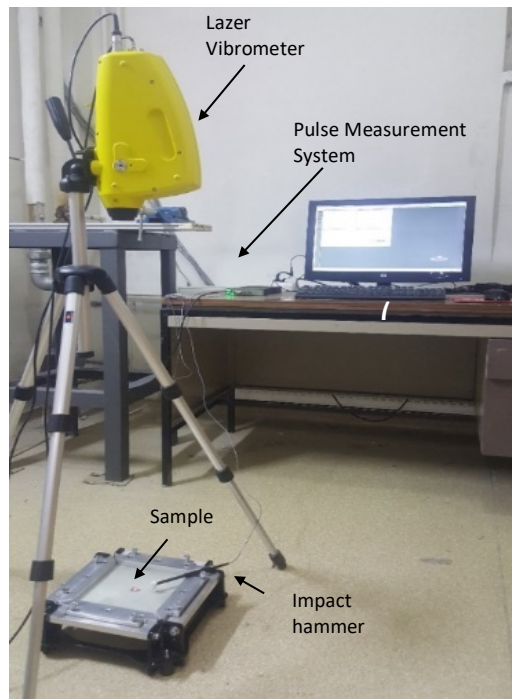


Fig. 2. Experimental Set-up

4. Experimental Validation Of The Numerical Model

The accuracy and applicability of the proposed model were shown by comparing the numerical results and the experimental results with each other. The width and length values of the FML composite plate considered in the experimental and numerical analyzes are $c=d= 0.18$ mm. The thickness of each glass prepreg, carbon

prepreg and aluminum materials are 0.18 mm, 0.25 mm and 0.3 mm, respectively. CFFC (two edges clamped and others free), CFCC (one edge free and the others clamped), and CCCC (all edges clamped) boundary conditions are discussed. It can be seen from Table 2, that there is a great agreement and accuracy between the experimental results and numerical results calculated by DQ methods.

Table 2. Comparing of the natural frequencies of the FML plates

Boundary Cond.	Layer sequence *	ω (Hz)			
		Solution Methods			
		DQ	ANSYS	Experimental	Error percentage# (%)
CCCC	A1	403.8	399.3	412.1	2.1
	A2	357.0	353.6	362.5	1.5
CFCC	A1	264.9	262.2	275.1	3.8
	A2	233.1	230.9	237.5	1.9
CFFC	A1	89.2	76.7	80.1	10.2
	A2	78.8	67.8	75.2	4.6

* $A_1 = (Al-G_{45^\circ/45^\circ}-G_{30^\circ/60^\circ}-G_{45^\circ/45^\circ}-G_{30^\circ/60^\circ})_s$; $A_2 = (G_{30^\circ/60^\circ}-Al-G_{30^\circ/60^\circ}-G_{45^\circ/45^\circ}-G_{30^\circ/60^\circ})_s$; Al=Aluminium ; G_θ : Glass prepreg; θ :Fiber orientation angle; # Error percentage# (%): Percentage difference value of the experimental result and the DQ method result.

5. Numerical Analysis

In this study, the effects of changes in the number of layers, fiber orientation angles and material properties on the natural frequencies of the FML composites in various anti-symmetric configurations as shown in Table 3, Table 4 and Table 5 were investigated.

Table 3. The configurations of GLARE

GLARE				
Group	Number of layers	of	Lay-up sequence	Orientation angle
G1	3		Al /G/ Al	
G2	5		Al /G/G/G/ Al	0°/90°
G3	7		Al /G/G/G/G/G/ Al	
G4	3		Al /G/ Al	
G5	5		Al /G/G/G/ Al	30°/60°
G6	7		Al /G/G/G/G/G/ Al	
G7	3		Al /G/ Al	
G8	5		Al /G/G/G/ Al	45°/-45°
G9	7		Al /G/G/G/G/G/ Al	

Table 4. The configurations of CARALL

CARALL				
Group	Number of layers	of	Lay-up sequence	Orientation angle
C1	3		Al /C/ Al	
C2	5		Al /C/C/C/ Al	0°/90°
C3	7		Al /C/C/C/C/C/ Al	
C4	3		Al /C/ Al	
C5	5		Al /C/C/C/ Al	30°/60°
C6	7		Al /C/C/C/C/C/ Al	
C7	3		Al /C/ Al	
C8	5		Al /C/C/C/ Al	45°/-45°
C9	7		Al /C/C/C/C/C/ Al	

Table 5. The configurations of HYBRID FMLs

HYBRID FMLs			
Group	Lay-up sequence	Orientation angle	Number of layers
H1	Al /C/G/C/ Al	0°/90°	5
H2	Al /G/C/G/ Al		
H3	Al /C/G/C/ Al	30°/60°	
H4	Al /G/C/G/ Al		
H5	Al /C/G/C/ Al	45°/-45°	
H6	Al /G/C/G/ Al		

6. Results And Discussions

The effects of the change in the fiber orientation angles of the GLARE FMLs under the CCCC boundary condition on the free vibrations of the structure is shown in Fig. 3. It is seen that there is no significant change in the natural frequencies of the plate depending on the change in fiber orientation angles. This is because glass fiber prepreps have a plain weave. The mechanical properties of these prepreps in the transverse and longitudinal directions are very similar to each other. Thus, the stiffness of the composite structure and hence its natural frequencies are not considerably impressed by the change in fiber orientation angles. Also, as the number of glass fiber layers in the structure increased, the natural frequencies also increased. Similar trend is noticed in the study of comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites by Aydın, et al. [21]. The reason for this is that by adding a glass fiber/epoxy layer to the structure, the rigidity of the plate increases with the increase in the number of layers of the structure. On the other hand, the mass amount of the composite structure also increases. As a result, the increase in the frequencies seen in the graphs reveals that the improvement in the rigidity of the structure is more dominant.

The effects of the change in the fiber orientation angles of the GLARE FMLs under the CFCC boundary condition on the free vibrations of the structure is shown in Fig. 4. Similar to Fig. 3, it is seen that the change of fiber angles does not cause a significant change on natural frequencies for the structure under the CFCC boundary condition.

The factors affecting the natural frequency of the FML plate are stiffness, density, and mass moment of inertia. Apart from these, it is observed that natural frequencies decrease significantly as the number of free edges of the composite structure increases (Fig. 5). The natural frequencies of FMLs under free edge boundary conditions are considerably lower than those of fully clamped FMLs due to the change in the restraint effect at the edges. Thus, unlike other boundary conditions, a composite structure with a clamped boundary condition increases its stiffness and thus its natural frequencies. When the relevant studies in the literature supporting this inference are examined, E. V. Prasad and S. K. Sahu concluded that the boundary conditions is more sensitive to the natural frequencies of plates [8].

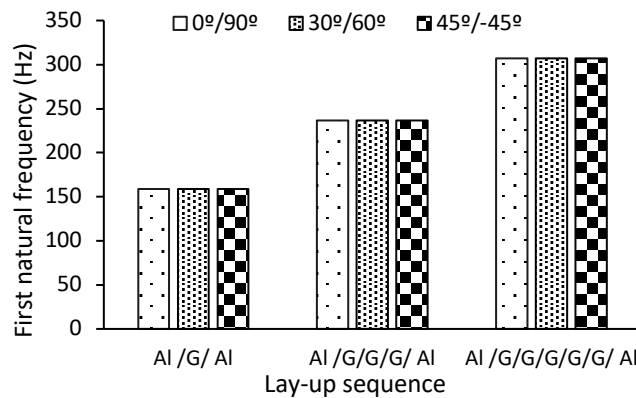


Fig. 3. GLARE FMLs under CCCC boundary conditions

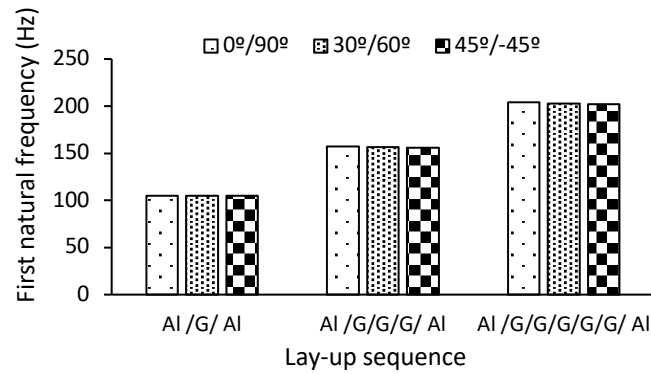


Fig. 4. GLARE FMLs under CFCC boundary conditions

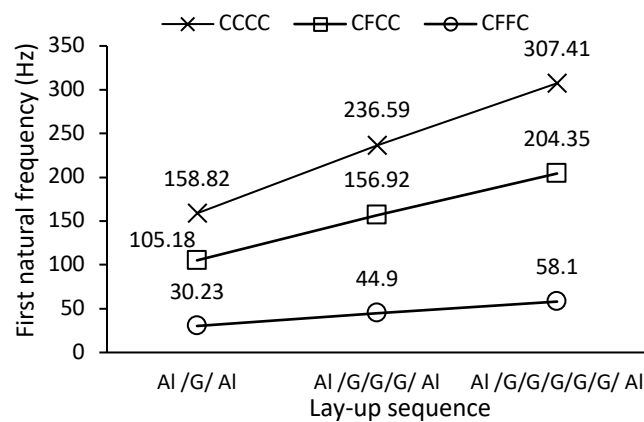


Fig. 5. GLARE FMLs under different boundary conditions

The effects of variation in fiber orientation angles of the carbon prepregs in the interlayers on the free vibrations of the structure for CARALL FMLs composites under the CCCC boundary condition are presented in Fig. 6.

The lay-up was designed as given configuration in Table 4 where the orientation angles $\theta = 0^\circ/90^\circ, 30^\circ/60^\circ, 45^\circ/45^\circ$.

The Fig. 6 is examined, it can be said that there is no significant change in the natural frequencies of the plate even though the change in fiber orientation angles. The reason can be clarified as follows: carbon fiber prepregs are plain woven, so their mechanical properties are close to each other in the longitudinal and transverse directions. Therefore, there is no appreciable effect on the stiffness of the composite structure despite the change in fiber orientation angles. It was also observed that the highest natural frequencies were obtained as the number of carbon fiber/epoxy layers in the structure increased. Similar trend is noticed in the study Free vibration analysis of fiber metal laminated straight beam by Maraş, et al. [22].

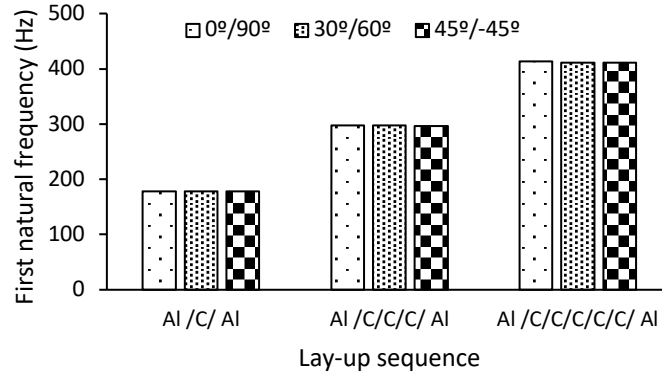


Fig. 6. CARALL FMLs under CCCC boundary conditions

The effects of various boundary conditions on the vibration behavior of the CARALL structure are examined in Fig. 7. The results show that the highest natural frequency values for the same sequence conditions of the layers have obtained at the CCCC boundary condition where the stiffness is higher.

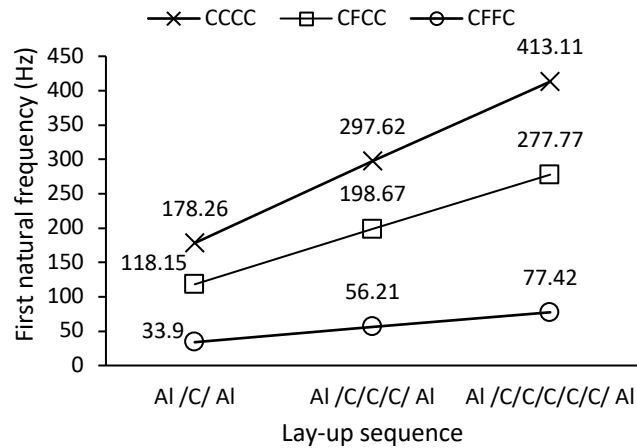


Fig. 7. CARALL FMLs under different boundary conditions

Fig. 8 shows the distribution plot of the natural frequencies obtained versus the change in fiber orientation angle for the hybrid FML composites given in Table 5. As a result of the change in fiber orientation angle, it is seen that there is no notable change in natural frequencies. Besides, the natural frequencies change with the change in fiber type.

The effect of placing the variable fiber type in the inner layers on the vibration properties was investigated in Fig. 9. It is seen that the natural frequency values of the structure increase as the number of carbon fiber epoxy layers in the structure increases by placing carbon fiber/epoxy layer instead of a glass fiber/epoxy layer. Supporting this result, in the study by Utomo, et al. [23], examining the influence of the number and position of the carbon fiber lamina on the natural frequency and damping ratio of the carbon-glass hybrid composite, it is determined that there is a significant decrease in natural frequency with the increase of the glass fiber laminates in the structures. The reason is that taking into consideration the material properties given in Table 1 as the number of carbon/epoxy layers increases, the density of the structure decrease.

Moreover, it is obtained that the natural frequency value of the Al /C/G/C/ Al sequence is higher than the natural frequency value of the Al /G/C/G/ Al sequence from the hybrid layer sequences (Fig. 9). This is because the lateral stiffness of the carbon/epoxy layer is higher than that of the glass/epoxy layers. Another reason is that the mass moment of inertia of the structure has a lower value if the glass fiber/epoxy layer is placed towards the center of the structure. When the relevant studies in the literature supporting this inference are examined, Muddappa, et al. [24] concluded that different hybrid configurations play an important role in the vibration behavior of the FML plate. They determined that the natural frequency of the plate is higher if

the outermost layers have a carbon fiber/epoxy layer instead of glass fiber/epoxy.

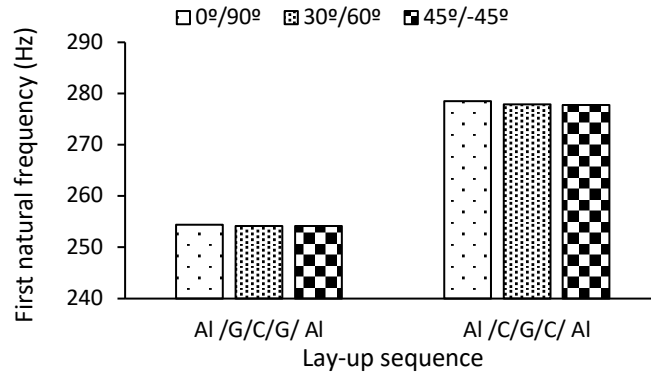


Fig. 8. Hybrid FMLs under CCCC boundary conditions

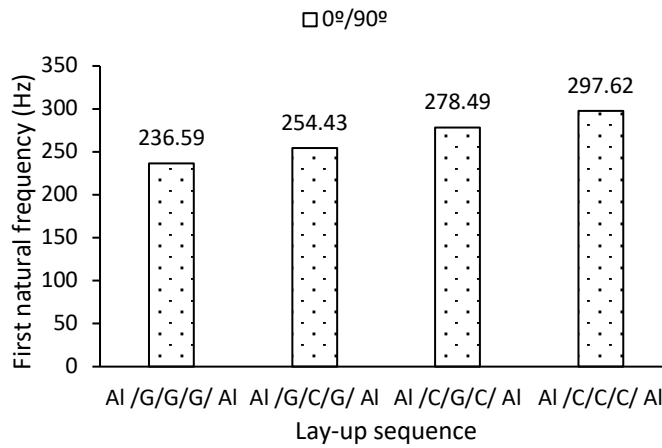


Fig. 9. Effects of fiber type changes on natural frequencies in 5-layer FML composites under CCCC boundary conditions

The natural frequencies of hybrid FML composites with 0°/90° fiber orientation angles were compared by changing the boundary conditions (CCCC, CFCC, CFFC) (Fig. 10).

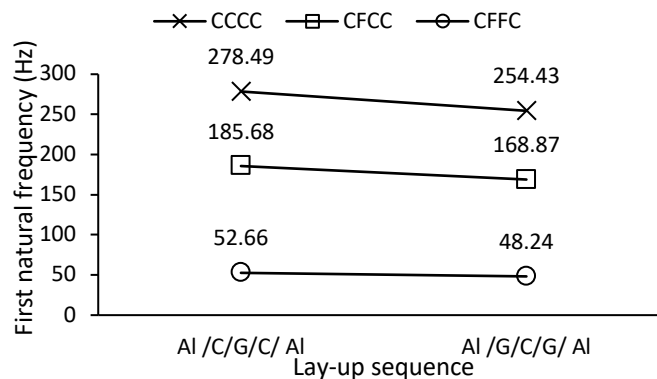


Fig. 10. Hybrid FMLs under different boundary conditions

Since the stiffness of the structure is higher in the CCCC boundary condition than in other boundary conditions, the natural frequency value of the structure is the highest in this boundary condition. Similar trend is noticed in the study Free vibration analysis of fiber metal laminated plates by Prasad and Sahu [25].

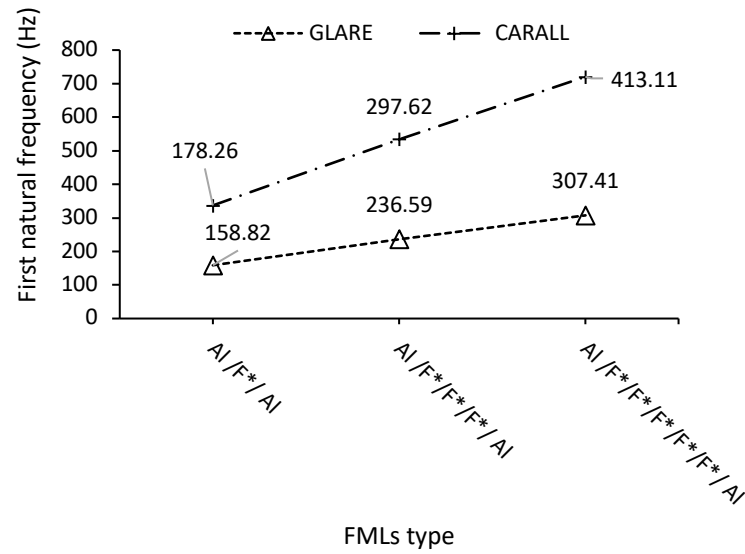


Fig. 11. Comparison of the first natural frequency of GLARE and CARALL composite plates

The comparison of natural frequencies of GLARE and CARALL composites under CCCC boundary condition and having the same configuration is given in Fig. 11. Here, the F* symbol denotes the fiber type in the form of glass fiber or carbon fiber. If the Fig. 11 is examined, it is seen that the natural frequencies of GLARE composites are lower than those of CARALL composites. This is based on glass prepregs with a lower elasticity modulus and higher density than carbon prepregs. When using a glass prepreg instead of a carbon prepreg, the density of the structure and the mass moment of inertia increase, resulting in a decrease in the natural frequency of the plates. In the study conducted by Utomo, et al. [23], which supports this result, it was determined that adding more carbon layers to the carbon-glass hybrid composite results in an increase in the natural frequency of the composite material.

6. Conclusion

In this study, free vibration behavior of GLARE, CARALL and Hybrid FML composites with antisymmetric lay-up was investigated by DQ method. From the examined configurations, the following determinations can be made.

- It was observed that there was no significant change in the natural frequencies of the plates, although the fiber orientation angles were changed in all FMLs examined.
- The highest natural frequencies were obtained in the CCCC boundary condition in all FMLs. It was cleared that as the number of free edges in the composite structure increases, the natural frequencies decrease significantly.
- It was also determined that the highest natural frequencies were obtained as the number of carbon fiber epoxy layers in the structure increased by placing a carbon fiber/epoxy layer instead of a glass fiber/epoxy layer.
- It was concluded that the first natural frequency values of CARALL composites were found to be higher than GLARE composites for the same boundary condition and configuration cases.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] R. Kolar, "Dynamic characteristics of layered metal-fiber composites including transverse shear deformation," *Smart Materials II*, 2002, vol. 4934: SPIE, pp. 270-278. doi:<https://doi.org/10.1117/12.469170>

- [2] H. Ravishankar, R. Rengarajan, K. Devarajan and B. Kaimal, "Free vibration behaviour of fiber metal laminates, hybrid composites, and functionally graded beams using finite element analysis," *International Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 21, no. 4, pp. 418-428, 2016. doi: <https://doi.org/10.20855/ijav.2016.21.4436>
- [3] C. Tao, Y. Fu and T. Dai, "Dynamic analysis for cracked fiber-metal laminated beams carrying moving loads and its application for wavelet based crack detection," *Composite Structures*, vol. 159, pp. 463-470, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.087>
- [4] B. Han, W. Hui, Q. C. Zhang, Z. Y. Zhao, F. Jin, Q. Zhang, T. J. Lu and B. H. Lu, "A refined quasi-3D zigzag beam theory for free vibration and stability analysis of multilayered composite beams subjected to thermomechanical loading," *Composite Structures*, vol. 204, pp. 620-633, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.005>
- [5] B. Harras, R. Benamar and R. White, "Experimental and theoretical investigation of the linear and non-linear dynamic behaviour of a glare 3 hybrid composite panel," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 252, no. 2, pp. 281-315, 2002. doi: <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3962>
- [6] A. Secgin, C. Atas and A. S. Sarigül, "The effects of composite plate design parameters on linear vibrations by discrete singular convolution method," *Journal of Composite Materials*, vol. 43, no. 24, pp. 2963-2986, 2009. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998309345>
- [7] F. A. Ghasemi, R. Paknejad and K. M. Fard, "Effects of geometrical and material parameters on free vibration analysis of fiber metal laminated plates," *Mechanics & Industry*, vol. 14, no. 4, pp. 229-238, 2013. doi: <https://doi.org/10.1051/meca/2013062>
- [8] E. Prasad and S. Sahu, "Vibration analysis of woven fiber metal laminated plates—experimental and numerical studies," *International Journal of Structural Stability And Dynamics*, vol. 18, no. 11, p. 1850144, 2018. doi: <https://doi.org/10.1142/S0219455418501444>
- [9] A. R. Ghasemi and M. Mohandes, "Free vibration analysis of micro and nano fiber-metal laminates circular cylindrical shells based on modified couple stress theory," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 27, no. 1, pp. 43-54, 2020. doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1472337>
- [10] S. Maraş and M. Yaman, "Free vibration analysis of fiber-metal laminated composite plates using differential, generalized and harmonic quadrature methods: experimental and numerical studies," *Engineering Computations*, vol. 39, no. 6, pp. 2326-2349, 2022. doi: <https://doi.org/10.1108/EC-08-2021-0490>
- [11] A. Shooshtari and S. Razavi, "Nonlinear free and forced vibrations of anti-symmetric angle-ply hybrid laminated rectangular plates," *Journal of Composite Materials*, vol. 48, no. 9, pp. 1091-1111, 2014. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998313482156>
- [12] C. Tao, Y.-M. Fu and H.-L. Dai, "Nonlinear dynamic analysis of fiber metal laminated beams subjected to moving loads in thermal environment," *Composite Structures*, vol. 140, pp. 410-416, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.011>
- [13] Y. Fu, Y. Chen and J. Zhong, "Analysis of nonlinear dynamic response for delaminated fiber-metal laminated beam under unsteady temperature field," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 22, pp. 5803-5816, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.06.015>
- [14] X. Shao, Y. Fu and Y. Chen, "Nonlinear dynamic response and active control of fiber metal laminated plates with piezoelectric actuators and sensors in unsteady temperature field," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 5, p. 055023, 2015. doi: [10.1088/0964-1726/24/5/055023](https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/5/055023)
- [15] H. Moraveji Tabasi, J. Eskandari Jam, K. Malekzadeh Fard and M. Heydari Beni, "Buckling and free vibration analysis of fiber metal-laminated plates resting on partial elastic foundation," *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 6, no. 1, pp. 37-51, 2020. doi: [10.22055/JACM.2019.28156.1489](https://doi.org/10.22055/JACM.2019.28156.1489)
- [16] Z. A. Siddiqi, "Analysis of interacting subdomains in structural mechanics problems by the differential quadrature method," Ph.D. dissertation, The University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 1995.
- [17] R. Bellman and J. Casti, "Differential quadrature and long-term integration," *Journal of mathematical analysis and Applications*, vol. 34, no. 2, pp. 235-238, 1971. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(71\)90110-7](https://doi.org/10.1016/0022-247X(71)90110-7)
- [18] C. Shu and B. E. Richards, "Application of generalized differential quadrature to solve two-dimensional incompressible Navier-Stokes equations," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 15, no. 7, pp. 791-798, 1992. doi: <https://doi.org/10.1002/flid.1650150704>
- [19] L. P. Kollar and G. S. Springer, *Mechanics of composite structures*. Cambridge university press, 2003.
- [20] R. F. Gibson, *Principles of composite material mechanics*. CRC press, 2016.
- [21] M. R. Aydin, V. Acar, F. Cakir, Ö. Gündoğdu and H. Akbulut, "Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites," *Composite Structures*, vol. 291, p. 115595, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115595>
- [22] S. Maraş, M. Yaman, M. F. Şansveren and S. K. Reyhan, "Free vibration analysis of fiber metal laminated straight beam," *Open Chemistry*, vol. 16, no. 1, pp. 944-948, 2018. doi: <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0101>
- [23] J. T. Utomo, D. D. Susilo and W. W. Raharja, "The influence of the number and position of the carbon fiber lamina on the natural frequency and damping ratio of the carbon-glass hybrid composite," in *International Conference on Engineering, Science and*

Nanotechnology, vol. 1788, no. 1: Solo, Indonesia:AIP Publishing, 2017. pp. 1-6.

[24] P. Y. Muddappa, T. Rajanna and G. Giridhara, "Effects of different interlaminar hybridization and localized edge loads on the vibration and buckling behavior of fiber metal composite laminates," *Composites Part C: Open Access*, vol. 4, p. 100084, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100084>

[25] E. Prasad and S. Sahu, "Free vibration analysis of fiber metal laminated plates," in *International Conference on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics*, Kharagpur, India: Proceedings of ICTACEM, 2017. pp. 1-10.

* *This article is an extended version of the paper presented at the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'22)*

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Evaluation of Different Mesh Types of Steel Roof Trusses According to AISC360-16 Code

Hilmi Arisoy^a, Gunnur Yavuz^b

Submitted: 17.01.2023 Revised: 28.04.2023 Accepted: 30.05.2023 doi:10.30855/gmbd.0705070

ABSTRACT

Keywords: Steel structure, industrial building, roof truss, AISC 360-16, LRFD

^{a,*} Konya Technical University,
Faculty of Engineering and Natural
Sciences,
Dept. of Civil Engineering
42250 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1436-0539
e mail: harisoy@ktun.edu.tr

^b Konya Technical University,
Faculty of Engineering and Natural
Sciences,
Dept. of Civil Engineering
42250 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8725-7129
e mail: gyavuz@ktun.edu.tr

*Corresponding author:
harisoy@ktun.edu.tr

Steel roof trusses are a frequently used element for carrying roof cover in industrial type structures. Roof trusses are generally preferred for long spans that cannot be designed with standard sections. These load bearing members can be created using many different types of mesh. In recent years, it has been observed that there are damages in the steel roof trusses due to heavy snowfall, especially in industrial buildings. Therefore, it is important to design these members safely and economically. In this study, roof trusses with 24 m span, 0.8 m side and 3.2 m ridge height were investigated for 5 different mesh types. A total of 20 analyses were performed for 4 different purlin distances using the SAP2000 program. Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16) published by The American Institute of Steel Construction was used for the member design of these 20 roof trusses, whose external geometric dimensions are the same. As a result, the most economical roof truss type and purlin distance were determined by comparing the roof truss and roof truss + purlin weights obtained from the design. Minimum cross sections and minimum total weight were obtained for Warren truss mesh type with 2.4 m purlin distance.

Farklı Örgü Tiplerindeki Çelik Çatı Makaslarının AISC360-16 Yönetmeliğine Göre Değerlendirilmesi

ÖZ

Çelik çatı makasları, endüstriyel yapılarda çatı örtüsünü taşımak için yaygın olarak kullanılan taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Çatı makasları genellikle standart kesitlerle tasarlanamayan uzun açıklıklar için tercih edilmektedir. Bu taşıyıcı elemanları oluşturmak için birçok farklı örgü türü kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle endüstriyel binalarda yoğun kar yağışı nedeniyle çelik çatı makaslarında hasarlar olduğu gözlemlenmektedir. Bu nedenle, bu elemanların güvenli ve ekonomik bir şekilde tasarlanması önem arz etmektedir. Bu çalışmada, 5 farklı örgü tipi için 24 m açıklıklı, 0.8 m kenar ve 3.2 m mahya yüksekliğine sahip çatı makasları incelenmiştir. SAP2000 programı kullanılarak 4 farklı aşık aralığı için toplam 20 adet analiz yapılmıştır. Dış geometrik ölçüleri aynı olan bu 20 adet çatı kirişine ait elemanların tasarımında Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü tarafından yayımlanan Yapısal Çelik Binalar Yönetmeliği (AISC 360-16) kullanılmıştır. Sonuç olarak, tasarımdan elde edilen çatı makası ve çatı makası + aşık ağırlıkları karşılaştırılarak en ekonomik çatı makası tipi ve aşık aralığı belirlenmiştir. En küçük kesitler ve en küçük toplam ağırlık Warren kafes tipi çatı makasında 2.4 m aşık aralığı için elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik yapılar, endüstriyel binalar, çatı makası, AISC 360-16, YDKT

1. Introduction

The beams designed to carry the roof covering in steel structures are called roof beams. These beams carry the weight of the roof covering and the loads acting on this member. Roof beams can be designed using standard sections for short spans. The dominant internal force in the design of roof beams is usually the bending moment. As the span increases, the bending moment formed in the beam also increases. One of the most ideal ways to meet this moment demand is to increase the beam height. Together with the bending moment, the shear force also occurs in the beam. However, the shear force capacity of the beam is usually quite higher than the demand. When the moment capacity is increased by increasing the beam height, the beam web cannot be used effectively. For this reason, designs with standard cross-sections do not give economical results for long spans. Industrial buildings usually need large openings for a well-planned work area. At this point, roof trusses are used instead of standard sections. Roof trusses are obtained by joining the ends of the members at the joints. The elements used in the roof truss do not transfer moment to the joints. Therefore, only axial force occurs on the elements of a roof truss, which is loaded from the joints. The members utilized as a part of steel truss framework are generally angles, double angles, channels, double channels, square hollow sections and circle hollow sections [1].

The roof truss mesh can be created in many different types. Warren truss, Howe truss and Pratt truss are the most common types of trusses [2]. These types have been used in trusses for many years. Before the widespread use of steel, roof trusses were usually made of wood [3]. Since the use of wooden roof trusses, the designs of different types of roof trusses have been studied. Nowadays, optimization plays a big role in the design of structures with a long span [4]. It is aimed to design roof trusses safely and economically by using optimization techniques. Considering the size of the areas where roof trusses are used, a small improvement in the design will make a great contribution economically. However, mistakes made in this design will have very severe consequences. The cost of damage caused by excessive snow load should be considered not only as repair costs, but also as the inability to use the building for a while, damage to the materials inside the building, possible injuries and loss of life [5]. When the published reports on the damaged steel roof trusses are examined, it was concluded that one of the biggest factors is the snow load [6]. It is observed that many steel roof trusses have collapsed due to heavy snowfall in the past. In this study, it is aimed to determine which of the roof trusses with different mesh types are the most economical for situations where snow load is the dominant load in the design.

2. Analysis of Different Roof Truss Types

In this study, the effect of mesh types for a steel roof truss was analysed. The examined roof trusses have a span of 24 m, a side height of 0.8 m and a ridge height of 3.2 m (Figure 1). In this design, the mesh type and purlin distance parameters are selected as variable. A total of 20 analyses were performed for 4 different purlin distances and 5 different mesh types.

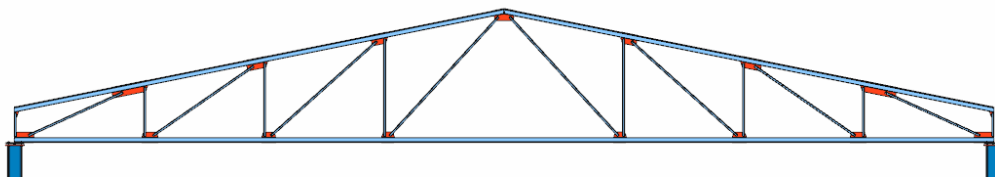


Figure 1. 3D view of T1 type roof truss

The five different mesh types used in the study are shown in Figure 2. T1, T2 and T3 types were chosen as the Howe, Pratt and Warren truss types, respectively, which are often used. T4 and T5 types were also created as a combination of other types. Since the roof truss can only be loaded from the joints, each type of mesh is arranged for purlin distance of 3.0 m, 2.4 m, 2.0 m and 1.5 m. The models created according to different purlin distances for the T1 mesh type are shown in Figure 3 as an example.

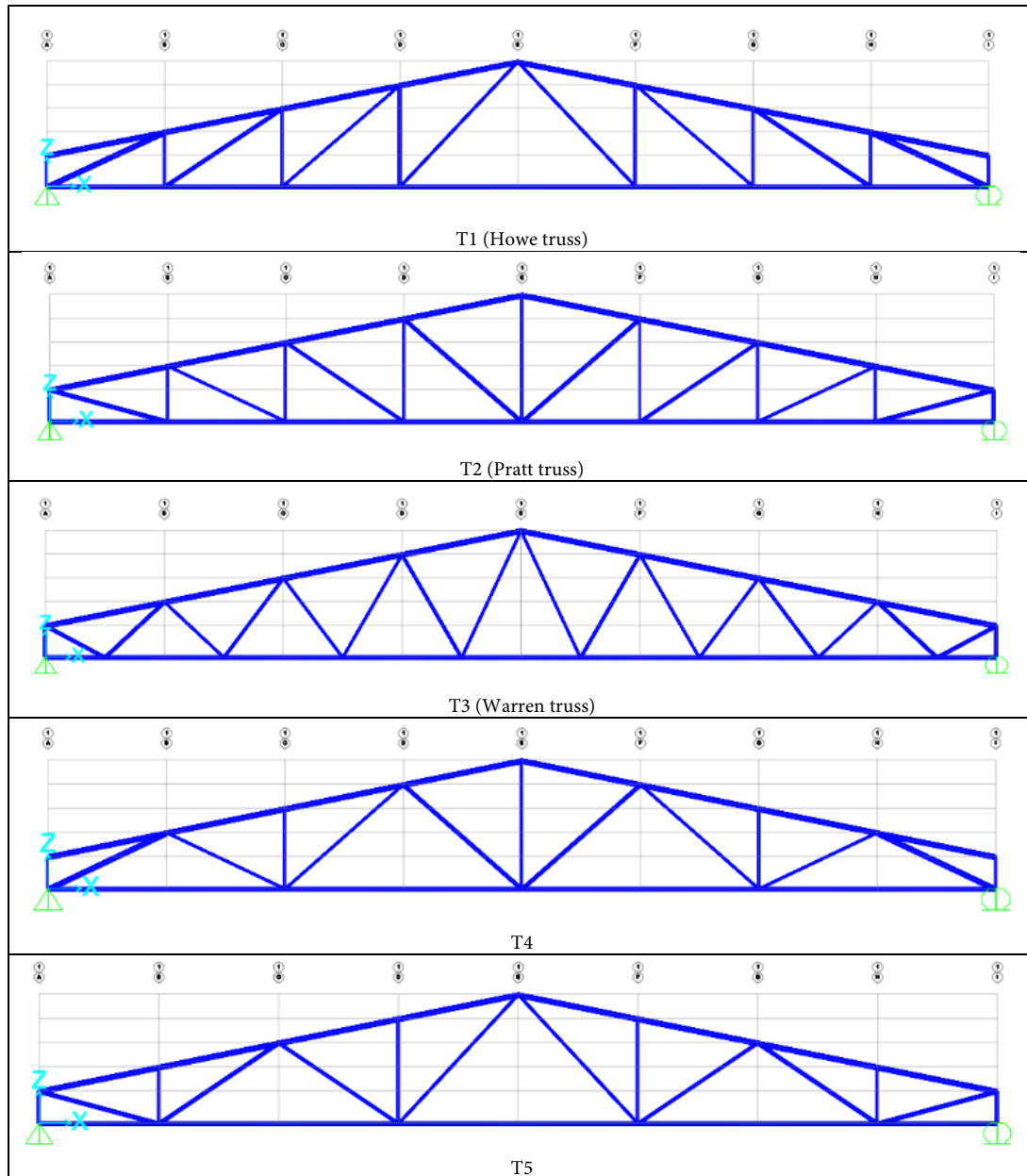


Figure 2. Roof truss types

The analyses were performed using SAP2000 v23.0 structural analysis and design program [7]. The steel grade of the profiles to be used in the steel roof truss has been selected as S235 defined in TS EN 10025-2 [8]. S235 grade steel has 235 MPa yield strength and 360 MPa tensile strength.

This study was carried out for the case when the snow load is effective in the design. For this reason, only the dead load (D) and snow load (S) are taken into account in the design. Other loads such as earthquake load, wind load, ice load and storm load have been ignored. The design was made in accordance with the Load and Resistance Factor Design (LRFD) provision. The following load combinations were obtained using ASCE/SEI 7-16 [9].

Load combinations for the limit states of strength;

- 1.4 D
- 1.2 D + 0.5 S
- 1.2 D + 1.6 S

Load combinations for the limit states of serviceability;

- 1.0 D + 0.5 S

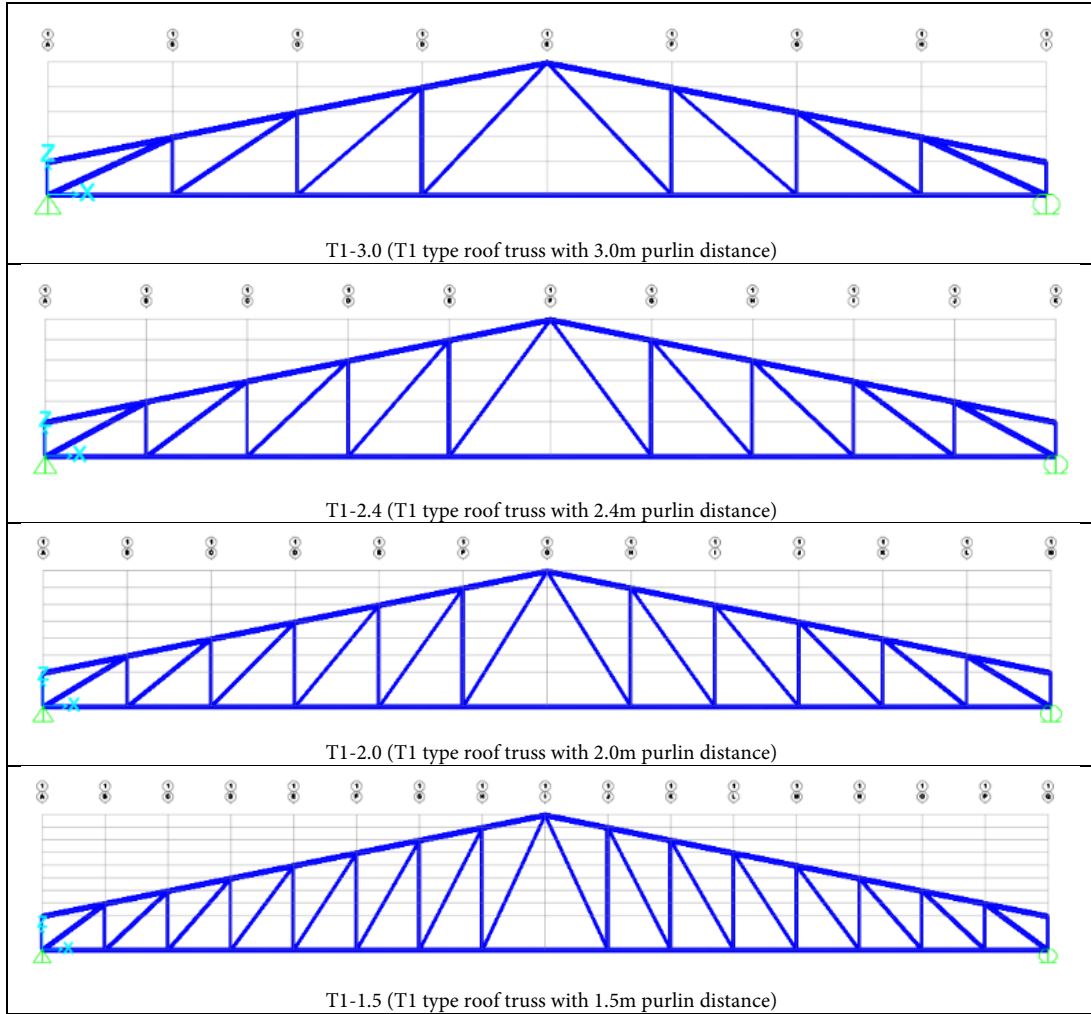


Figure 3. T1 type roof trusses with different purlin distances

The double angle built-up section was used for designing tension and compression members of roof trusses. A typical double angle section is shown in Figure 4. Also, all double angle sections used in steel design are given in Table 1.

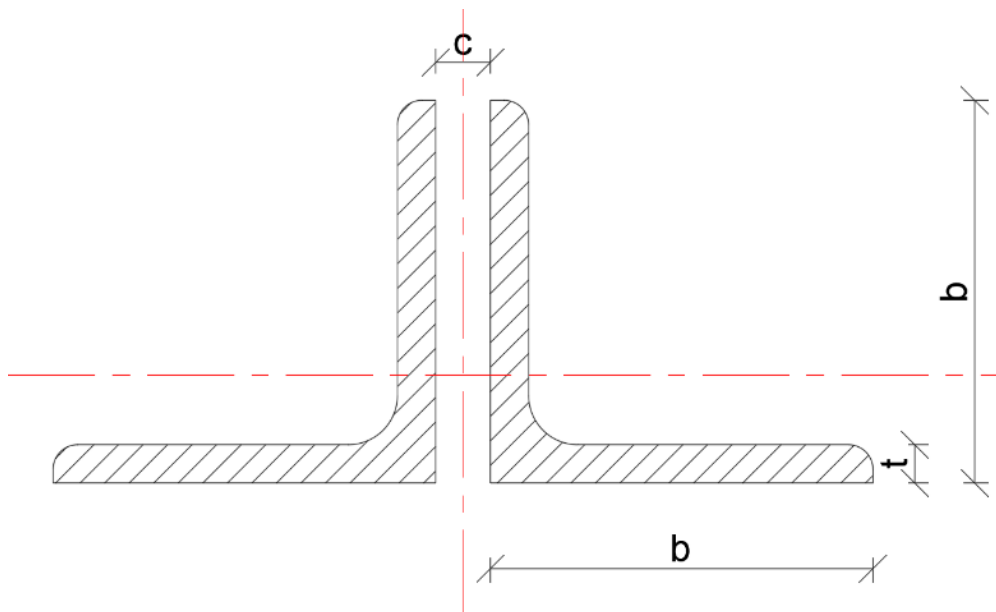


Figure 4. Typical double angle section ($2LbXt/c$)

Table 1. Steel section list used in the design

Section list	
2L45X4.5/10/	2L75X7/10/
2L50X5/10/	2L80X8/10/
2L55X5/10/	2L90X9/10/
2L60X6/10/	2L100X10/10/
2L65X6/10/	2L110X10/10/
2L70X7/10/	2L120X12/10/

One end of the roof trusses was modeled as a pinned support and the other end as a roller support. Also, pinned connections were defined at the ends of the members. The weight of the roof trusses was automatically added to the dead load. In addition, a dead load of 0.1 kN/m² on the roof was taken into account. The characteristic snow load value was determined as 1.60 kN/m² from TS EN 1991-1-3 [10]. The distance between the roof trusses was considered to be 7.5 m. The individual loads at the joints were calculated by the loads spread over the area were multiplied by the purlin distance and 7.5 m. The snow load values calculated for T1-3.0 roof truss are shown in Figure 5 as an example.

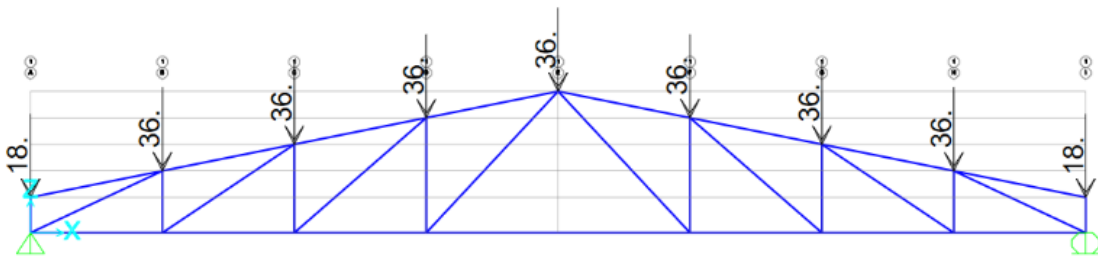


Figure 5. Snow load for T1-3.0 (kN)

The axial force values of the members found as a result of the analysis are shown in Figure 6, and the deformed roof truss shape is shown in Figure 7 for T1-3.0 roof truss.

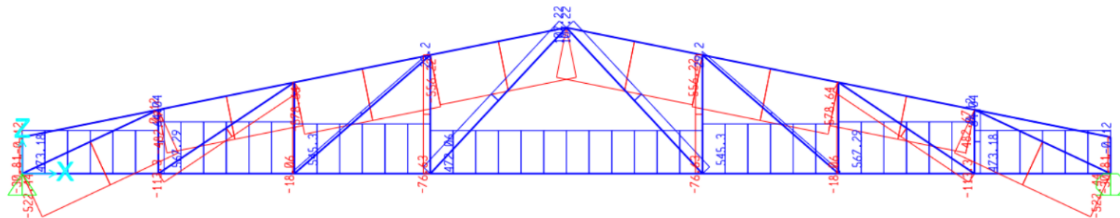


Figure 6. Axial force diagram for T1-3.0 (kN)

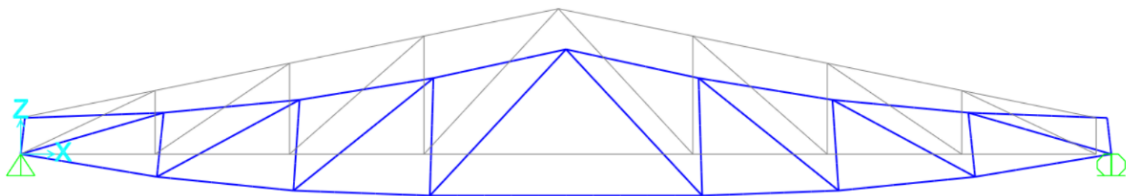


Figure 7. Deformed shape for T1-3.0

In the SAP2000 program, the analyses were performed in the two dimensions. The design of steel elements was made using the AISC 360-16 regulation [11]. When designing the tension members, the limit states of tensile yielding in the gross section and tensile rupture in the net section were taken into account using Equation 1 and Equation 2, respectively. It was assumed that the effective net area to gross area ratio of members is 0.8. In addition, the limit value of 300 which is recommended by the regulation was used for the slenderness of the tension members.

$$P_{nt} = F_y * A_g \quad (\text{the limit state of tensile yielding}) \quad (1)$$

$$P_{nt} = F_u * A_e \quad (\text{the limit state of tensile rupture}) \quad (2)$$

Where; P_n : characteristic tensile strength, F_y : yield stress, F_u : tensile stress, A_g : gross area of a section, A_e : effective section area which can be calculated by $A_n * U$ (U : shear lag factor, A_n : net section area)

The limit states of flexural buckling and flexural-torsional buckling were taken into account when designing the compression members by Equations 3 to 7. All the sections given in Table 1 are classified as nonslender-element sections according to AISC360-16 Table B4.1a. For this reason, local buckling does not occur in the compression members. In addition to the strength of these elements, it was checked that the slenderness did not exceed the maximum permissible value of 200. In these elements, since the both ends of the elements are connected with pinned support, the effective length factor is taken as 1. For built-up sections, it is necessary to calculate the modified slenderness value depending on the type and placement of the fasteners. In this study, the fasteners were not calculated. Therefore, it was assumed that the modified slenderness ratio of the members was 1.1 times the slenderness ratio of the corresponding member. The same cross-section was selected to the complete top chord elements when designing. Similarly, the all bottom chord elements were designed with the same cross-section. The design results for the T1-3.0 roof truss are shown in Figure 8.

$$P_{nc} = F_{cr} * A_g \quad (\text{the limit state of buckling}) \quad (3)$$

$$\text{When } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \quad F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad (4)$$

$$\text{When } \frac{F_y}{F_e} > 2.25 \quad F_{cr} = 0.877 F_e \quad (5)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{r}\right)^2} \quad (\text{for flexural buckling}) \quad (6)$$

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}}\right] \quad (\text{for flexural-torsional buckling}) \quad (7)$$

Where; P_n : characteristic compression strength, F_y : yield stress, F_e : elastic buckling stress, F_{ey} : elastic buckling stress about y-axis, F_{ez} : elastic buckling stress about longitudinal axis, F_{cr} : critical stress, A_g : gross area of a section, L_c : effective length of member for buckling, E : modulus of elasticity of steel (200000 MPa), r : radius of gyration, H : flexural constant.

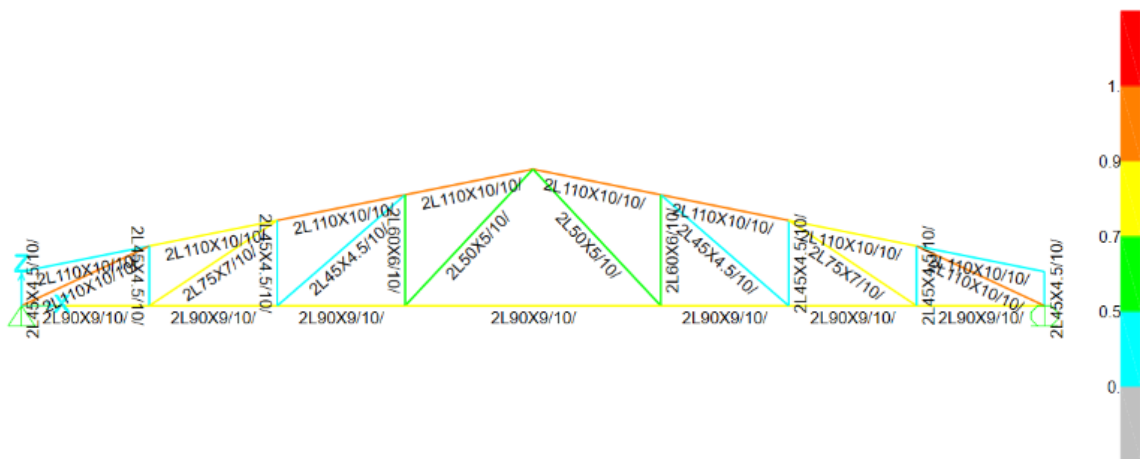


Figure 8. Design sections and capacity ratios for T1-3.0

In addition to the roof truss, the design of purlins was also made. The purlins were solved as a singular element independently of the roof truss (Figure 9). One end of the purlins is designed as a pinned support, the other end is designed as a roller support. The purlins are designed to have a sag rod at the $L/3$ points (L : beam span). For this reason, the displacement in the horizontal direction is restricted at $L/3$ points.

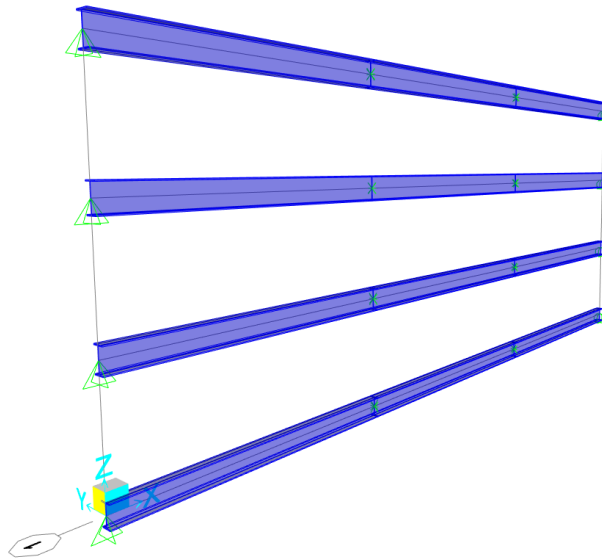


Figure 9. 3D view of purlins

The snow load was added on the purlins as a linear distributed load (Figure 10). The purlins standing on the roof truss have the effect of bending in both directions due to the slope of the roof truss. Linear distributed loads were obtained by multiplying the purlin distance with the snow load acting on the unit area. The loads found were distributed in 2 directions according to the slope of the roof truss. The obtained bending moment graphs are given in Figure 11.

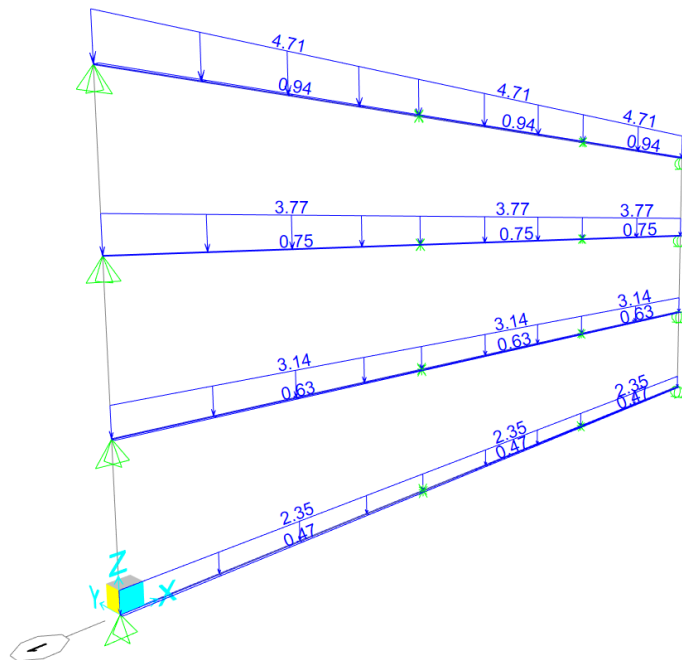


Figure 10. Snow load for the purlins (kN/m)

Purlins are designed under the effect of two-way bending moment and shear force. IPE sections were used for the purlins. Since all cross-sections used in the purlins are compact, the design was made by considering the limit state of yielding and the limit state of lateral torsional buckling for bending about major axis using Equation 8 to 11. Similarly, for bending about minor axis, the limit state of yielding was taken into account by Equation 12. The capacity ratios of purlins under the effect of two-way bending moment are shown in Figure 12. For the shear force, the design was made using Equation 13 and Equation 14 in the strong and weak direction, respectively. Also, the capacity ratios for shear forces in both directions are given in Figure 13.

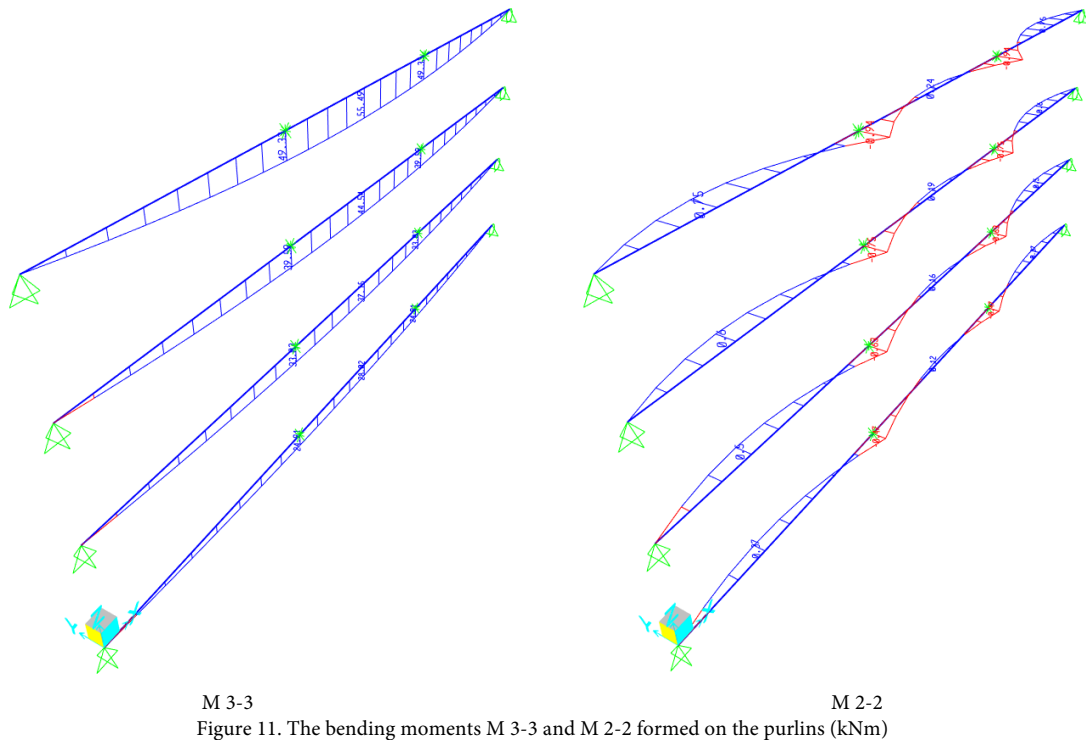


Figure 11. The bending moments M 3-3 and M 2-2 formed on the purlins (kNm)

$$M_n = M_p = F_y W_{px} \quad (\text{the limit state of yielding}) \quad (8)$$

$$\text{For } L_b \leq L_p \quad (\text{the limit state of lateral-torsional buckling does not apply}) \quad (9)$$

$$\text{For } L_p < L_b \leq L_r \quad M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (10)$$

$$\text{For } L_b > L_p \quad M_n = F_{cr} W_{ex} \quad (11)$$

$$M_n = M_p = F_y W_{py} < 1.6 F_y W_{ey} \quad (\text{the limit state of yielding}) \quad (12)$$

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} \quad (13)$$

$$V_n = 0.6 F_y b_f t_f C_{v2} \quad (14)$$

Where; M_n : characteristic flexural strength, M_p : plastic flexural strength, W_{px} : plastic section modulus about the x-axis, W_{ex} : elastic section modulus about the x-axis, W_{py} : plastic section modulus about the y-axis, W_{ey} : elastic section modulus about the y-axis, C_b : lateral-torsional buckling modification factor, F_{cr} : critical stress for lateral-torsional buckling L_b : length between points that are either braced against lateral displacement of the compression flange or braced against twist of the cross section, L_p : the limiting laterally unbraced length for the limit state of yielding, L_r : the limiting unbraced length for the limit state of inelastic lateral-torsional buckling, A_w : area of web, C_{v1} and C_{v2} : the web shear strength coefficients, b_f : width of flange, t_f : thickness of flange.

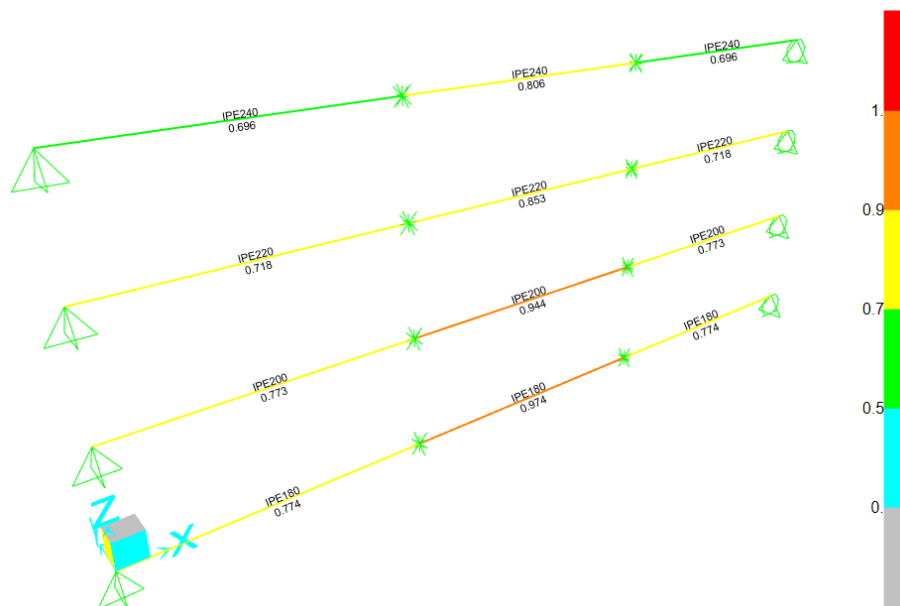


Figure 12. Capacity ratios of purlins for bending moments

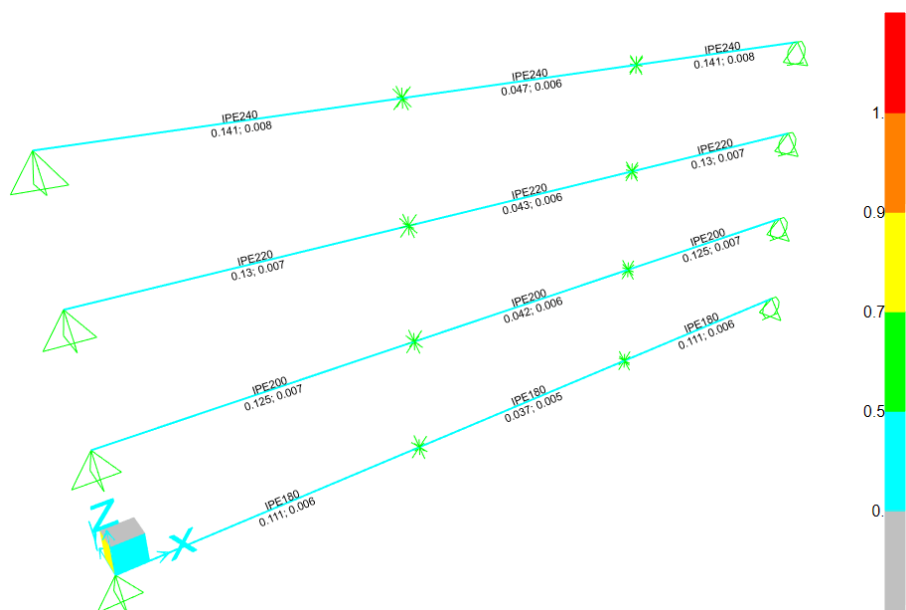


Figure 13. Capacity ratios of purlins for shear force

3. Comparison of Analysis Results

The roof truss weights obtained as a result of the analysis are given in Table 2. Also, the obtained data are shown in Figure 14 as a surface plot. The lowest roof truss weight was achieved for the T3 (Warren) type at a purlin distance of 2.4 m. Table 3 shows how much the roof truss weights are higher than the lowest roof truss weight by percentage.

Table 2. Roof truss weights (kN)

Purlin distance (m)	Roof truss type					Avg.
	T1	T2	T3	T4	T5	
3.0	19.17	18.40	17.34	18.56	18.18	18.33
2.4	18.24	17.70	16.86*	17.52	17.35	17.53
2.0	18.27	17.97	17.22	17.54	17.13	17.63
1.5	18.95	18.66	18.08	17.95	17.59	18.25
Avg.	18.66	18.18	17.38	17.89	17.56	

*Minimum weight

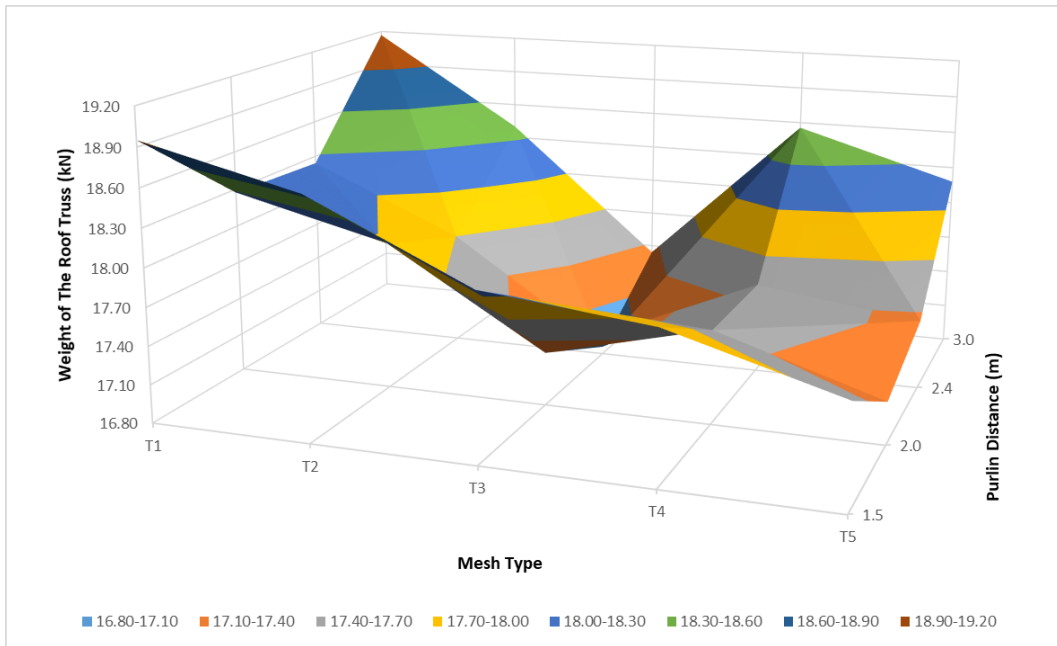


Figure 14. Surface plot of truss weight

Table 3. Percentage difference according to the minimum roof truss weights (%)

Purlin distance (m)	Roof truss type				
	T1	T2	T3	T4	T5
3.0	13.68	9.13	2.85	10.06	7.83
2.4	8.19	4.96	0.00	3.93	2.91
2.0	8.38	6.58	2.13	4.01	1.61
1.5	12.41	10.66	7.25	6.47	4.32

When the comparison was made according to the type of mesh, the weights of the roof trusses from the lowest to the highest were obtained as follows (Figure 15);

$$W_{T3} < W_{T5} < W_{T4} < W_{T2} < W_{T1}$$

In this comparison, the same ranking was obtained for the average values and the minimum values.

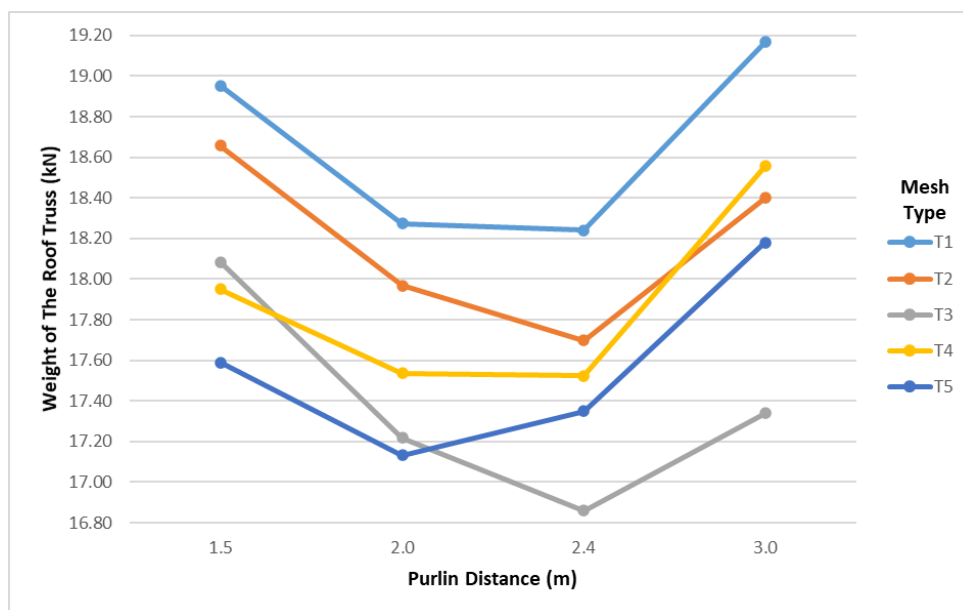


Figure 15. Truss weights vs mesh types

When the roof truss weights are evaluated according to the purlin distance, the following ranking has been

obtained (Figure 16).

for the average roof truss weights;

$$W_{2.4} < W_{2.0} < W_{1.5} < W_{3.0}$$

for the minimum roof truss weights;

$$W_{2.4} < W_{2.0} < W_{3.0} < W_{1.5}$$

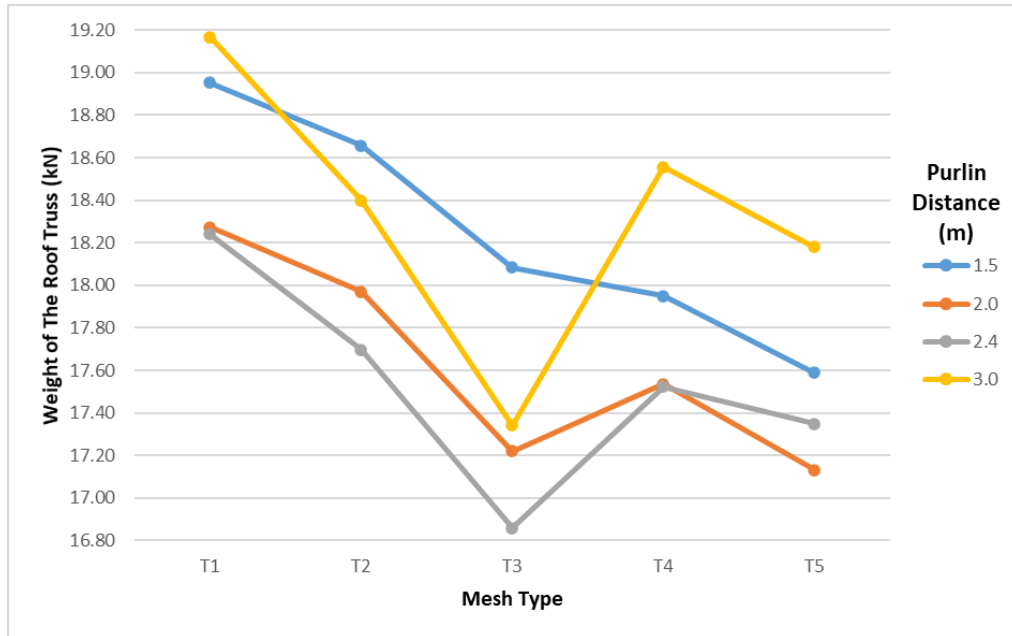


Figure 16. Truss weights vs purlin distances

The displacements at the midpoint of the roof trusses are shown in Table 4. The maximum allowable displacement is calculated as 80 mm using the limit value of $L/300$ [9]. All the displacement values obtained are less than this limit value.

Table 4. Displacements at the midpoint of the roof trusses (mm)

Purlin distance (m)	Roof truss type				
	T1	T2	T3	T4	T5
3.0	22.34	23.57	21.79	22.45	22.99
2.4	22.76	23.99	22.74	23.11	23.05
2.0	22.89	23.83	22.73	22.75	23.21
1.5	22.78	23.62	23.02	22.39	22.94

As a result of the analysis of the purlins, the purlin sections were obtained as shown in the Table 5. The weight of a purlin with a length of 7.5 m for each section is indicated in the third column of Table 5. For each purlin distance, the total number of purlins between two roof trusses and, accordingly, the total weight of the purlins were calculated.

Table 5. Cross sections and weights of the purlins

Purlin distance (m)	Purlin section	Purlin weight (kN)	Number of purlins	Total purlin weight (kN)
3.0	IPE 240	2.26	10	22.58
2.4	IPE 220	1.93	12	23.14
2.0	IPE 200	1.65	14	23.04
1.5	IPE 180	1.38	18	24.84

The total roof weight was obtained by collecting the purlin weights and the roof truss weights (Table 6). In addition, the percentage differences according to the minimum value are shown in Table 7.

Table 6. Total roof weights (kN)

Purlin distance (m)	Roof truss type					Avg.
	T1	T2	T3	T4	T5	
3.0	41.75	40.98	39.92*	41.14	40.76	40.91
2.4	41.38	40.83	40.00	40.66	40.49	40.67
2.0	41.32	41.01	40.26	40.58	40.18	40.67
1.5	43.79	43.50	42.92	42.79	42.43	43.09
Avg.	42.06	41.58	40.78	41.29	40.96	

*Minimum weight

Table 7. Percentage difference according to minimum total roof weights (%)

Purlin distance (m)	Roof truss type				
	T1	T2	T3	T4	T5
3.0	4.58	2.66	0.00	3.05	2.10
2.4	3.65	2.29	0.19	1.85	1.42
2.0	3.50	2.74	0.86	1.65	0.64
1.5	9.70	8.96	7.52	7.19	6.28

With the addition of purlin weights, it is seen that the order given for the mesh type remains the same (Figure 17);

$$W_{T3} < W_{T5} < W_{T4} < W_{T2} < W_{T1}$$

However, with the addition of purlin weights, it is seen that the order given for the purlin distance changes as follows (Figure 18);

for the average roof truss weights;

$$W_{2.4} = W_{2.0} < W_{3.0} < W_{1.5}$$

for the minimum roof truss weights;

$$W_{3.0} < W_{2.4} < W_{2.0} < W_{1.5}$$

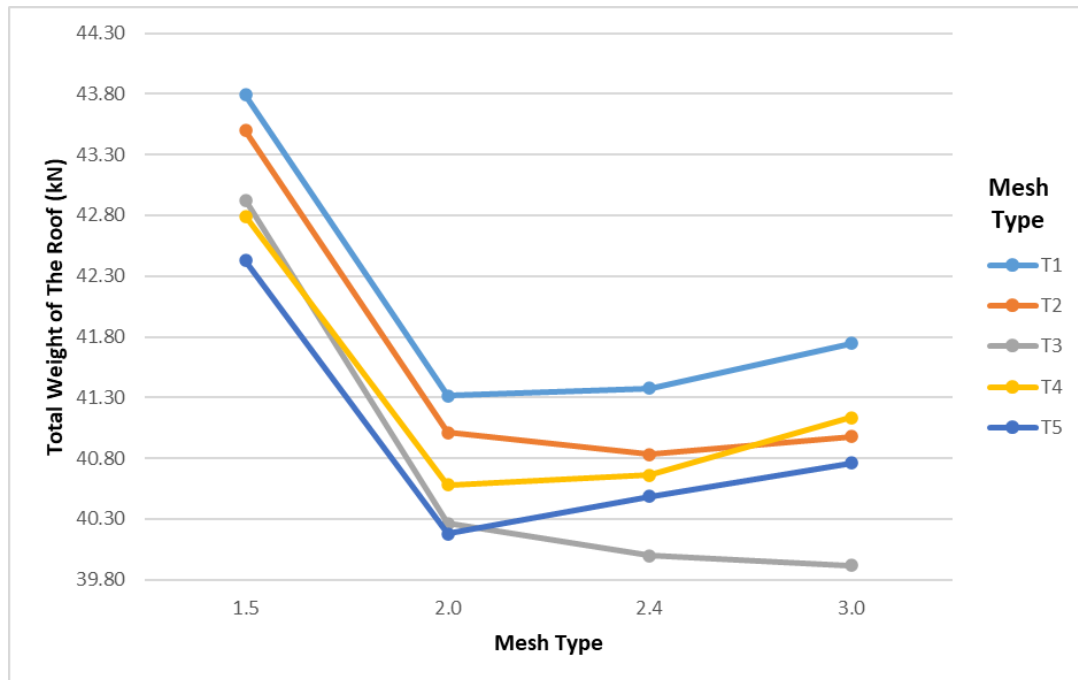


Figure 17. Total roof weights vs mesh types

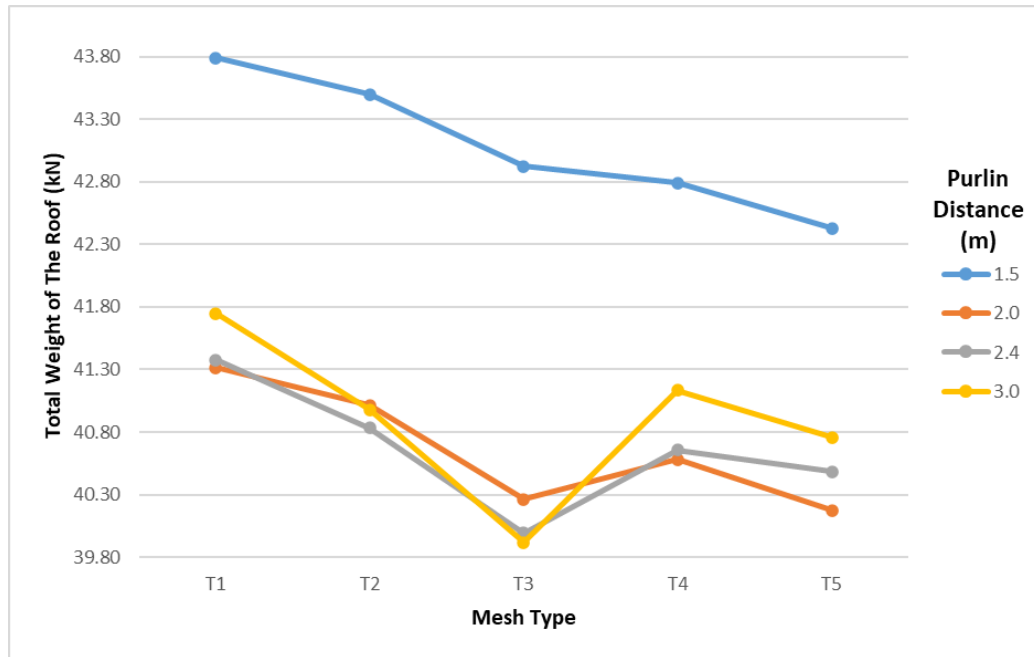


Figure 18. Total roof weights vs purlin distances

4. Results and Discussion

Many steel roofs have been damaged due to heavy snowfalls experienced in recent years. These damages have led to great financial losses. In order to prevent these losses, a design should be made that has both sufficient strength and is economical. For this reason, this study has been carried out in order to provide convenience to those who want to design a steel roof. In this study, the effect of mesh type and purlin distance on the weight of steel roof trusses was investigated in the case where snow load is the dominant load. The results obtained from this study are limited to the cases where only the snow load is effective in the design. Some important results of this study can be summarized as follows:

- The most economical result among the types of roof truss mesh is obtained from the T3 (Warren) type with 3.0 m purlin distance.
- In the weight of the steel roof, the roof trusses and the purlins have approximately the same proportion of impact.
- For purlin distances below 2 m, the T5 type works better than the T3 type.
- The low truss weights have been achieved for the purlin distances of 2.0 m - 2.4 m. Although, an increase in total purlin weight was observed with a decrease in purlin distance. As a result, the minimum values for the total roof weight were obtained between 2.0 m - 3.0 m.
- The biggest roof truss weights were obtained from the T1 type. Similarly, the 1.5 m purlin distance has also led to obtaining the biggest roof weights.
- Similar displacement values were obtained for all roof trusses.

Conflict of Interest Statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- [1] G. Kaur, R. S. Bansal and S. Kumar, "Shape Optimization of Roof Truss," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 5, pp. 696-700, 2016.
- [2] S. N. Rahane and S. K. Nalawade, "A Review on Optimization of Industrial Trusses," *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, vol. 5, no. 1, pp. 237-242, January 2022.
- [3] P. Munafò, F. Stazi, C. Tassi and F. Davi, "Experimentation on historic timber trusses to identify repair techniques compliant with the original structural-constructive conception," *Construction and Building Materials*, vol. 87, pp. 54-66, July 2015.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.086

[4] Y. Shved, Y. Kovalchuk, L. Bodrova, H. Kramar and N. Shynhera, "Material consumption optimization of a welded rafter truss made of angle profiles," *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 10-16, 2022. doi:10.1016/j.prostr.2021.12.076

[5] J. Geis, K. Strobel, and A. Liel, "Snow-induced building failures," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 26, no. 4, pp. 377-388, August 2012. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000222

[6] J. Krentowski, T. Chyzy, P. Dunaj, and P. Dunaj, "Delayed catastrophe of a steel roofing structure of a shopping facility," *Engineering Failure Analysis*, vol. 98, pp. 72-82, April 2019. doi:10.1016/j.engfailanal.2019.01.082

[7] CSI, "SAP2000 v23.0 Integrated Software for Structural Analysis and Design," Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 2021.

[8] TSE, "TS EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels. Part 2-Technical delivery conditions for non-alloy structural steels," Institute of Turkish Standard (TSE), Ankara, Türkiye, 2006.

[9] ASCE, "ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures – Provisions," ASCE Standard. American Society of Civil Engineers. 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia, 20191. ISBN 978-0-7844-1424-8, 2016.

[10] TSE, "TS EN 1991-1-3: Eurocode 1-Actions on structures-Part 1-3: General actions-Snow loads," Institute of Turkish Standard (TSE), Ankara, Türkiye, 2007.

[11] AISC, "ANSI/AISC 360-16: An American National Standard – Specification for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction. 130 East Randolph Street, Suite 2000, Chicago, Illinois, 60601. July 7, 2016

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effects of Infill Geometry and Porosity Ratio on Mechanical Properties of PLA Structures Produced by Additive Manufacturing

Rukiye Yeşiloğlu^a, Ramazan Özmen^{b*}, Mustafa Günay^c

Submitted: 24.01.2023 Revised: 29.05.2023 Accepted: 08.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705071

ABSTRACT

Keywords: Additive manufacturing, fused deposition, infill geometry, mechanical property, plastic material

^a Karabük University,
Institute of Graduate Programs
78050 - Karabük, Türkiye

^{b*} Karabük University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechatronics Engineering
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6020-8538
e mail:ramazanozmen@karabuk.edu.tr

^c Karabük University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1281-1359
e mail:megunay@karabuk.edu.tr

*Corresponding author:
ramazanozmen@karabuk.edu.tr

The fabrication of intricately formed parts, challenging with the traditional manufacturing approach, is facilitated by additive manufacturing (AM). Stacking the material layer by layer and using the 3D data from the model, parts are created using this technique. The design of parts with various porosities inside the same cell structure and industry sector-specific manufacture are both made possible by this technology. With varied infill geometries and porosity ratios, pieces made from PLA material with different mechanical properties were compared in this study. Parts were made for this purpose using fused deposition modeling (FDM) and various infill geometries (Octet, Gyroid, and Cross). The unit cell size for infill geometries was set at 5x5x5mm, and test samples with porosities of 50%, 30%, and 20% were created. Tensile, compression, and impact tests were conducted to examine the mechanical behavior of these parts, and the best unit cell structure was selected based on the assessed mechanical properties. In general, it was found that all fill geometries' mechanical qualities declined with increasing porosity ratio. The Octet infill geometry structure had the maximum tensile strength. However, the Cross infill geometry sample had the most significant deformation.

Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Yapılarda Dolgu Geometrisi ve Gözenek Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi

ÖZ

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi, geleneksel üretim teknikleri ile imalatı zor olan kompleks geometriye sahip parçaların kolay bir şekilde üretilmesini sağlayan bir imalat metodudur. Bu imalat yönteminde, üretilen parçaların 3D verileri yardımıyla malzeme katmanlar halinde yığılarak parçalar üretilmektedir. Eriyik yığıma modelleme (EYM) yöntemi termoplastik malzemelerden parça üretiminde sıklıkla kullanılan bir Eİ yöntemidir. Bu çalışmada, PLA malzemedeki üretilen parçalarda farklı dolgu geometrisi ve gözenek oranının bu parçaların mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Parçaların mekanik davranışlarını araştırmak amacıyla çekme, basma ve darbe deneyleri ilgili standartlara göre yapılmış ve karşılaştırılan mekanik özellikler açısından en uygun birim hücre yapısı belirlenmiştir. Bu amaçla, farklı dolgu geometrilerine (Octet, Gyroid ve Cross) ve gözenek oranlarına (%50, %30 ve %20) sahip numuneler birim hücre boyutu 5x5x5mm olacak şekilde her bir deney standardına uygun boyutlarda modellenmiş ve EYM yöntemiyle üretilmiştir. Genel olarak, tüm dolgu geometrilerinde gözeneklilik oranının artmasıyla mekanik özelliklerin kötüleştiği görülmüştür. Octet dolgu geometriye sahip yapıda en yüksek çekme dayanımı elde edilirken, Cross dolgu geometriye sahip yapıda en fazla şekil değişimi görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, eriyik yığıma, dolgu geometrisi, mekanik özellik, plastik malzeme

1. Introduction

Depending on the development of technology, the demand for special products is increasing with improved geometry, weight/strength, and aesthetics that can be used in different areas. Traditional machining methods may be insufficient to meet the geometrically optimized part/product needs and increase product demands, especially to provide the desired strength. For this purpose, different production technologies are being developed apart from traditional production methods. In contrast to machining, manufacturing technologies (plastic forming, additive manufacturing, welding, casting, etc.) in which materials are shaped by adding a wide range of product needs can be met. In this context, additive manufacturing methods, also known as three-dimensional (3D) manufacturing, which entered our lives with the developing technology, have begun to be used in all industries. In this production method, a piece that is difficult to produce with the machining method can be designed in 3D in a computer environment and produced in layers. In this manufacturing technology, parts with complex geometries can be produced at affordable costs, and industrial parts from many different materials such as plastic, ceramic, metal, or composite.

The additive manufacturing (AM) method allows structures to be built relatively quickly with highly complex infill geometries. With technological advances, the AM, which has been used for producing non-functional prototypes for years, has enabled making products with more industrial use potential than prototype products. In addition, AM has enabled the making of products of the same or better quality than traditional manufacturing methods for highly complex parts. The infill term, referring to the internal structure of an object printed in additive manufacturing, represents a stable structure selected by the user in the slicing software and a certain percentage of volume formed by this structure. The infill pattern and volume percentage significantly affect the printing process and the printed object's physical properties. Therefore, a high-volume percentage increases material consumption and printing time while producing parts that are more resistant to external loads [1]. In this context, experimental and theoretical studies have been conducted in the literature to determine the optimum infill geometries that can guide users in the design of light and mechanically robust prints [2,3]. For example, Deshpande et al. [4] investigated the effective mechanical properties of octet-lattice structures experimentally and theoretically. They stated that octet-lattice structures could be used as an alternative to metallic foams in porous structures. Baich et al. [5] investigated the interaction between filler designs and mechanical properties according to ASTM test standards and production cost time. They stated that continuous infill with the same production costs has higher strength under all loading conditions than double-layer intermittent filler. Vicente et al. [6] performed an experimental study to investigate the effect of filling patterns and density on the mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts produced by AM. They stated that the difference in modulus of elasticity between honeycomb and linear patterns might be due to the different deposition trajectories and interlayer bonding regions between both patterns. Kumar et al. [7] stated in their studies that annealing and high filling density of FDM improved the mechanical properties of the samples printed with Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) and Carbon Fiber reinforced Polyethylene Terephthalate Glycol (CFPETG) material. Ganeshkumar et al. [8] experimentally and theoretically investigated the effects of gyroid, rhombic, circular, octahedron, and honeycomb fillers on the mechanical properties of 3D-printed Polylactic Acid (PLA) parts. They stated that the honeycomb infill pattern exhibited better mechanical properties than other infill structures. Lubombo and Huneault [9] analyzed the mechanical properties of PLA samples produced with FDM using three infill densities and five infill patterns by tensile and bending tests. The results showed that the hexagonal filler type performed best in balancing tension and bending mechanical properties. On the other hand, in addition to static tests, there are also studies examining the effect of filler geometry and density on mechanical properties in parts produced with AM under dynamic loads, albeit slightly. Tsouknidas et al. [10] investigated the effects of filling geometry and density on the energy absorption capacity of cylindrical parts produced with PLA and stated that the filling density has the most substantial effect on energy absorption, followed by layer height and filling pattern, respectively.

In this study, the effect of infill geometry and porosity on the mechanical behavior of the part was investigated experimentally in PLA-based plastic products produced using AM technology. It is understood from the literature that the tensile and compression behavior of parts produced with AM in different infill geometries is generally examined. In the presented study, the effect of the porosity ratio and the filling geometry on the part's mechanical properties was determined by impact tests in addition to the tensile and compression behavior. For this purpose, experimental samples with different pore ratios were modeled and produced in Octet, Gyroid, and Cross fill geometries, which are recommended for industrial use. The samples were

modeled according to the relevant test standards and produced using a 3D printer based on the FDM method. Finally, it is aimed to contribute to the literature by determining the most suitable filling geometry and porosity ratio based on the considered mechanical properties.

2. Material and Methods

2.1. Material and Infill Geometry

In this study, three different infill geometries, Octet, Gyroid, and Cross, and three different porosity ratios (20%, 30%, and 50%) were decided apart from previous studies. Figure 1 shows the infill geometries selected for the test samples. Accordingly, parametric designs of Polylactic Acid (PLA) based samples were made for tensile, compression, and impact tests using 3D CURA software. The temperature was kept constant during the production of the samples. In the FDM-based additive manufacturing process, the most proper production parameters (such as printing speed, temperature, and construction direction) for the selected plastic material were obtained from the studies in the literature [11]. Some mechanical and physical properties of PLA used in the study are given in Table 1.

Table 1 Mechanical and physical properties of PLA [12]

Density	Melt Flow Rate	Melting Temperature	Tensile Strength	Impact Strength	Glass Transition Temperature, T_g
1.24 g/cc	7-9 g/10 dk.	165-180 °C	43 MPa	0.310 J	55-60 °C

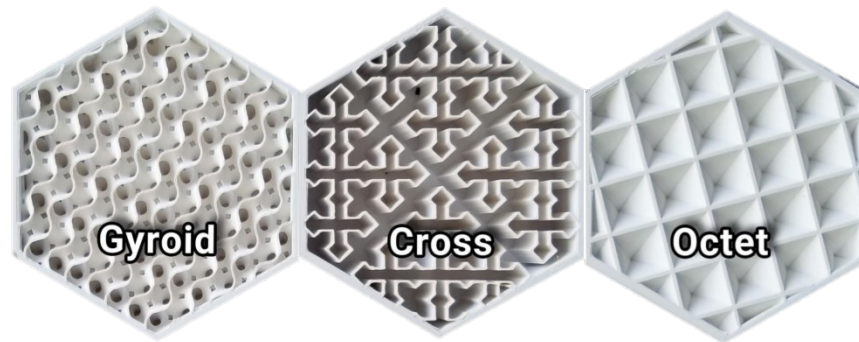


Figure 1 Unit cell structures used for infills [13].

2.2. Design and Production of Samples

Compression tests were carried out per the ASTM D695 standard, used in determining the rigid plastics' compression properties, to examine the effect of infill geometry and porosity ratio on the mechanical compression properties. To this end, Octet, Gyroid, and Cross unit cell shaped compression samples were designed with external dimensions of 25mm×25mm×25mm and pore ratios of 20%, 30%, and 50%. Additionally, relative density is an essential property used to characterize the mechanical behavior of cellular materials. Therefore, in the study, the porosity ratios of the samples were adjusted without changing the unit cell dimensions (5×5×5, in mm), only by changing the cell filling rates. The designed compression samples were produced using the FDM method from PLA material at a constant temperature (200 °C) in the Ultimaker additive manufacturing device [14].

For tensile strength of mechanical properties, samples with Octet, Gyroid, Cross unit cell structure, and 20-50% porosity ratios were designed and manufactured according to ASTM D638 standard. ASTM-D638 standard is a test method used to determine the tensile properties of rectangular plastic specimens. This standard has five different types of test specimens that can be used for reinforced composites, rigid, semi-rigid, non-rigid plastics, and rigid pipes. Type 1 specimen, whose dimensions are given in Figure 2, was used for the tensile test. The tensile specimens were produced using the 3D printer according to the above-mentioned manufacturing conditions.

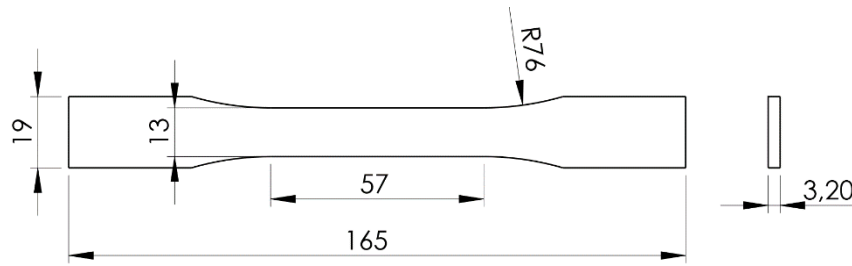


Figure 2. Type 1 specimen dimensions (mm)

Impact behavior was investigated as the third method in the analysis of the mechanical properties of PLA parts produced by additive manufacturing. For this purpose, unnotched 10x10x80 mm length samples with 20%, 30% and 50% filling ratios were produced in accordance with ISO 179 standard. The ISO 179 standard determines plastics' Charpy impact strength with pendulum-type testers. In design of these sample, octet, gyroid, and cross-unit cell shapes were used in the core of the structure. As with other mechanical property samples, the printing temperature for impact samples was set at 200°C.

3. Experimental Studies

To evaluate the effects of infill geometry and porosity ratio on the mechanical properties of the parts produced with FDM, tensile, compression, and impact tests were applied to the samples according to the relevant standards. In this context, compression tests were conducted according to the ASTM D1621 standard, which is used to determine the compressive behaviors of solid cellular plastics. An Instron tensile-compression test machine was used for the test. The loading speed was set at a constant 2 mm/min and carried out as a quasi-static compression test. The tests were carried out by turning each printed sample in the printing direction and perpendicular to the printing direction (90°). A total of 36 samples were tested by performing two retests for each sample. In addition, no lubricant was used on the contact surfaces between the sample and the plate during the experiments. The same test device was also used for the tensile test. Tensile tests were carried out per the ASTM D638 test standard, in the form of a semi-static tensile test, by applying a speed of 2 mm/min. The samples' tensile damage loads were determined using the force-elongation curves obtained at the end of the test. The examples of the images of the samples during and after the tensile test are given in Figure 3.



Figure 3. Application of the tensile test and the final state of the samples.

Impact tests were carried out according to the ISO 179 (Charpy test) standard to determine the impact resistance of the samples produced by the FDM method. Devotrans pendulum impact tester was used for Charpy impact tests. In the experiments, a hammer with a 152.7 g weight, suitable for the physical properties of the plastic material, was used. Samples were produced with the dimensions of 80x10x8 mm for the test. Additionally, shell structures with a thickness of 0.5 mm were formed on the samples' bottom, top and side surfaces. The steps of the impact test are shown in Figure 4.

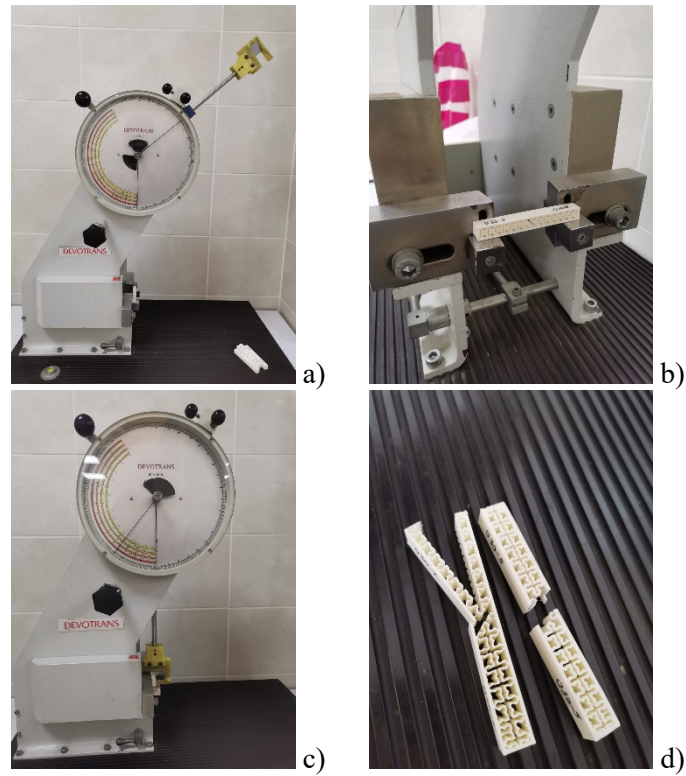


Figure 4. The stages of impact test: a) Initial position of the hammer on the test device, b) Sample binding, c) Impact location of the hammer on the test device, d) Sample view after the test [14].

4. Results and Discussions

4.1. Compression Test Results

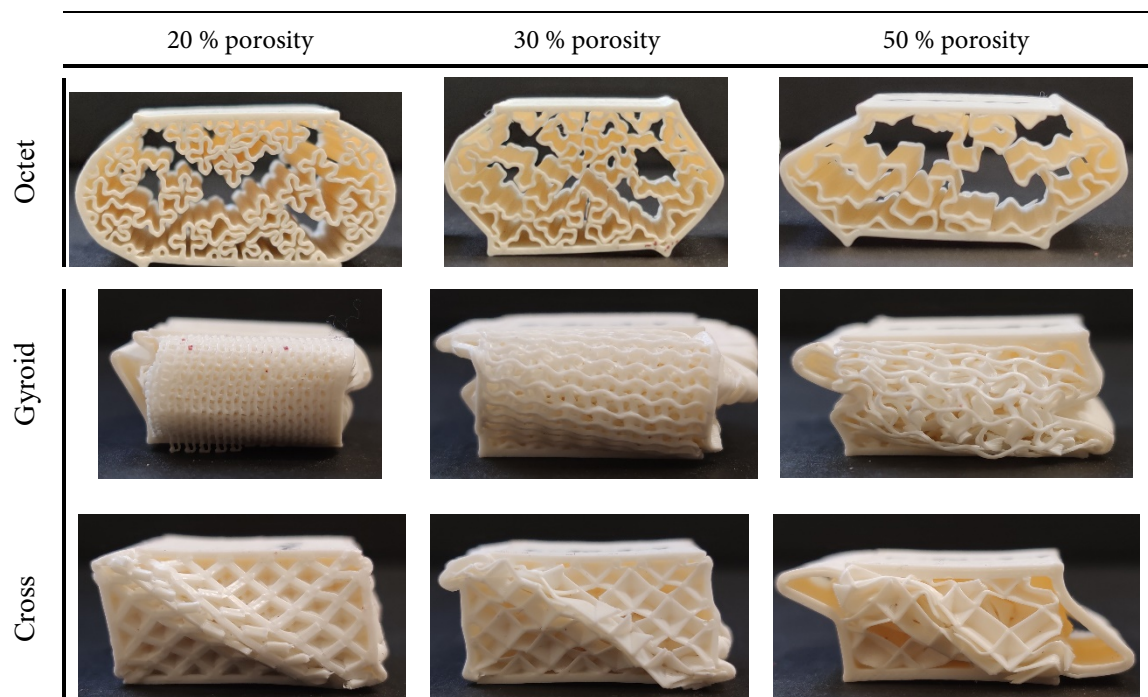


Figure 5. Shape changes in the samples at the end of the compression test.

To examine the effect of infill geometry (unit cell structure) and porosity ratio on the compressive strength

in PLA-based parts, six samples from each infill geometry were subjected to compression testing per ASTM D1621 standard. In Figure 5, the images of the samples after the compression test are given. In addition, the stress-strain diagrams obtained at the end of the compression test, depending on the change in the porosity ratio of the samples with Octet, Gyroid, and Cross unit cell structures, are given in Figure 6-8, respectively. The elastic modulus of the samples was calculated by considering the elastic region in the compressive stress-strain diagram and given in Table 1.

Table 1. Elasticity modulus and yield stress obtained by the compression test.

Modulus of Elasticity (MPa)						
Porosity Ratio (%)	Perpendicular to the printing direction			In printing direction		
	Cross	Gyroid	Octet	Cross	Gyroid	Octet
20	829.59	1107.50	135.42	874.40	926.77	1137.50
30	537.79	534.69	80.674	573.05	601.55	911.55
50	459.14	402.60	55.343	534.16	485.64	724.38
Yield Strength (MPa)						
20	15.72	18.43	1.180	18.01	16.16	18.75
30	9.29	9.21	0.708	10.71	9.83	13.08
50	8.18	5.58	0.646	9.87	7.05	9.86

In stress-strain diagrams obtained from compression tests of cellular structures and materials, it is stated that, generally, three deformation zones occur. These three regions are; the elastic region, called the pre-yielding stage, the plateau region formed after yielding, and the final compression region. The deformation behavior of these structures is classified as brittle or ductile depending on the plateau region's stress-strain values [15]. As can be seen from the graphs given in Figure 6-8, the stress-strain diagrams of the compression specimens consist of elastic, plateau, and final compression regions. Similar compression behaviors were obtained in different cellular structures [16]. When the compression behavior was evaluated in general, it was determined that the compressive elasticity modulus of the samples increased in all infill geometries with decreasing porosity. Structural anisotropy is one of the most critical parameters affecting the mechanical properties of porous parts produced with FDM. It has been stated that increasing the unit cell size of the cellular structure increases the printing sensitivity of the printer, which reduces the structural anisotropy of the additive manufacturing part [17]. Therefore, the structural anisotropy of the samples increased as the unit cell size of the fill geometry decreased. This formation caused an increase in the compressive elasticity modulus in samples with different fill geometry.

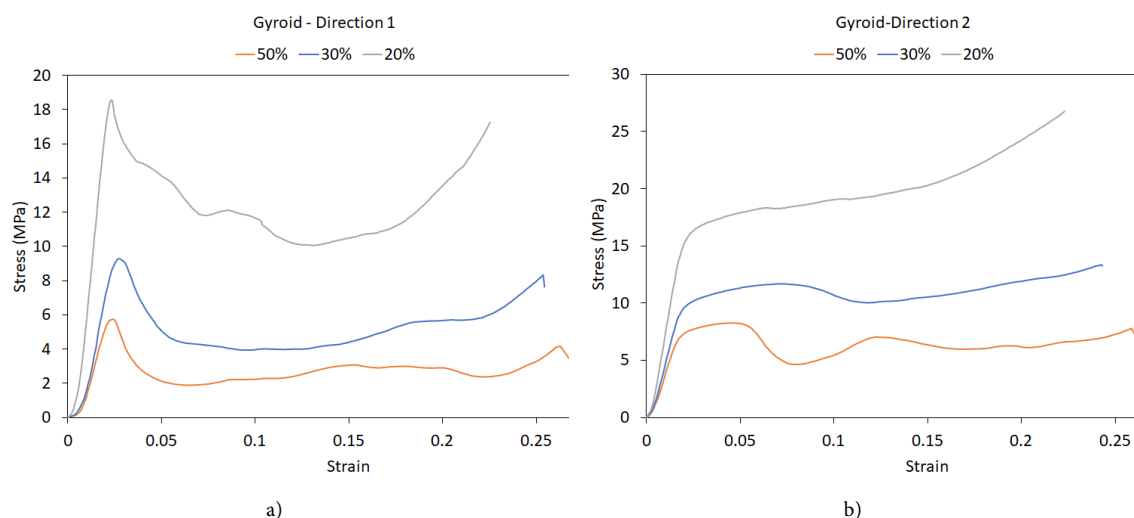


Figure 6. Stress-strain diagrams of specimens with Gyroid infill geometry; a) Direction 1 (perpendicular to printing direction) b) Direction 2 (in printing direction).

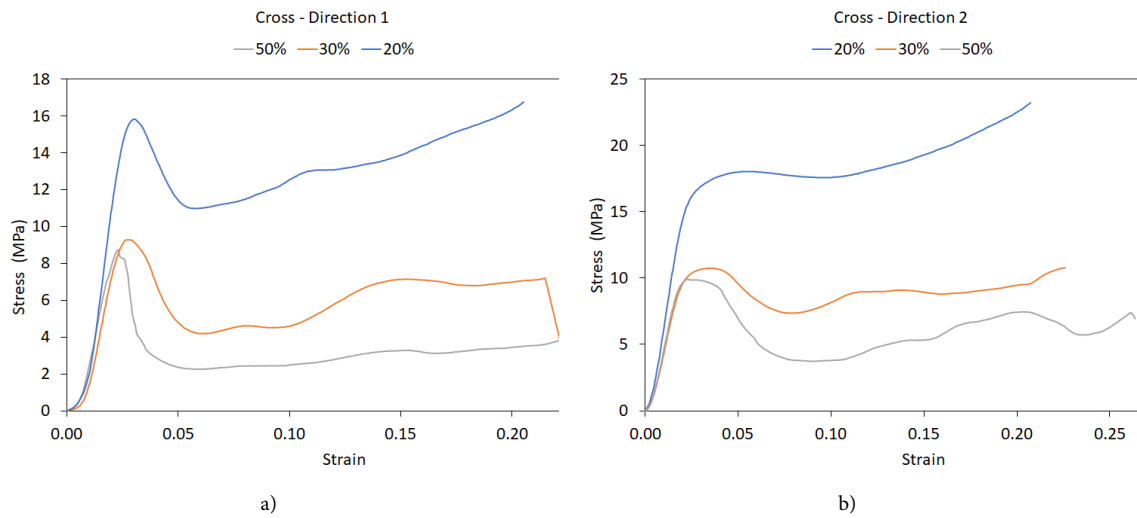


Figure 7. Stress-strain diagrams of specimens with Cross infill geometry; a) Direction 1 (perpendicular to printing direction) b) Direction 2 (in printing direction).

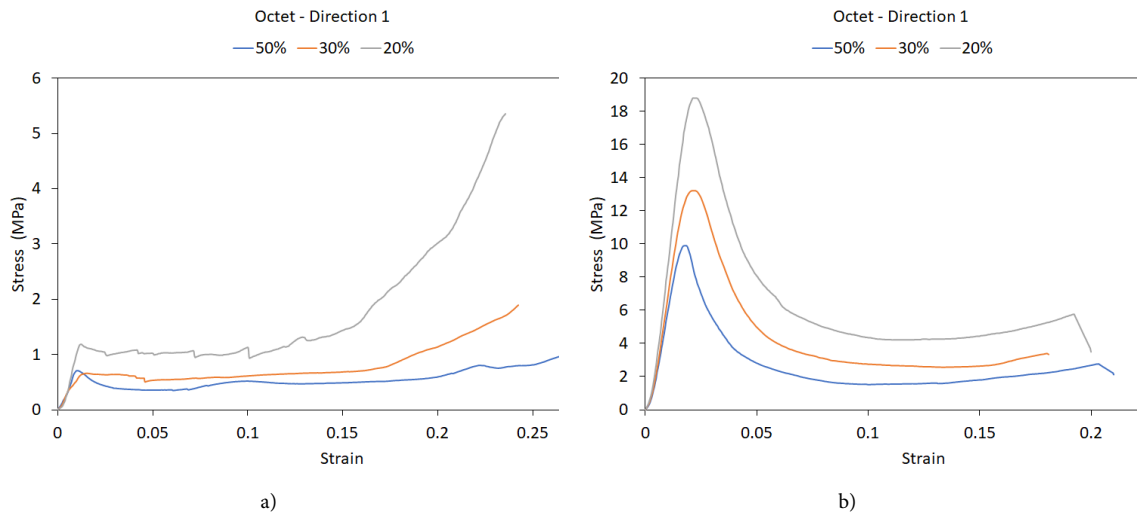


Figure 8. Stress-strain diagrams of specimens with Octet infill geometry; a) Direction 1 (perpendicular to printing direction) b) Direction 2 (in printing direction).

The Octet infill geometry samples' elasticity modulus were obtained as 724.38 MPa, 911.55 MPa, and 1137.5 MPa on average for 50%, 30%, and 20% density ratios, respectively, by the compressing in the printing direction. However, these were obtained as 55.343 MPa, 80.674 MPa, and 135.42 MPa, respectively, by compressing perpendicular to the sample's printing direction. In the samples with gyroid infill geometry, the modulus of elasticity was obtained as 926.77 MPa, 601.55 MPa, and 485.64 MPa for the 50%, 30%, and 20% porosity ratios, respectively, by compressing the sample in the printing direction. In addition, compressive elasticity modules of 402.6 MPa, 534.69 MPa, and 1107.5 MPa were obtained for the specimen's compressed perpendicular to the printing direction. However, the compressive modulus of elasticities for specimens with Cross infill geometry were obtained as 534.16 MPa, 573.05 MPa, and 874.4 MPa in the printing direction for 50%, 30%, and 20% porosity ratios, respectively, and obtained as 459.14 MPa, 537.79 MPa and 829.59 MPa in the opposite to the printing direction. According to these results, the highest compressive elasticity modules and yield stresses were obtained in Octet infill geometry when the specimen was positioned vertically (in the printing direction). In contrast, the lowest compressive stress and elasticity modules were obtained when the specimen was positioned perpendicular to the printing direction. In addition, when the specimen was positioned horizontally (perpendicular to the printing direction), the highest compressive stresses and modulus of elasticity were obtained in the Cross infill geometry, except for the 20% porosity ratio. These

results show that the compression behavior of the parts may change according to the printing direction of the parts, according to the difference in the filling geometry as well as the material type [18].

4.2. Tensile Test Results

Three samples from each cell structure were subjected to tensile tests to determine the effect of infill geometry and porosity ratio on tensile strength. Samples prepared according to ASTM D638 standards were tested using an Instron tensile-compression tester. At the end of the test, the effects of the pore ratio and filler geometry on the tensile strength were examined by taking the average of the results obtained for the three samples.

The views of the samples after the tensile test are given in Figure 9. In the tensile tests of the filled samples produced by the FDM method, the fracture of the samples starts from the corners close to the sample holding jaws due to the stress concentrations caused by the diameter transitions. In the presented study, deformations occurred as fractures in the diameter transition region of the samples with Gyroid and Octet infill geometries. When the fracture patterns were examined, it was seen that some ductile deformation occurred due to the cellular structure. On the other hand, the deformation in Cross-infill geometry samples first occurred as the separation of the unit cells along the mid-symmetry line of the sample. Then it ruptured in the diameter transition region as in the Gyroid and Octet cell-filled samples.

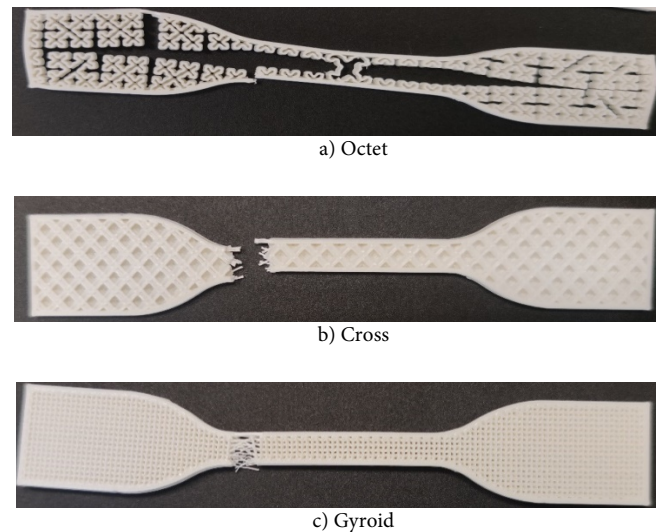


Figure 9. Views of the samples with a 20% porosity ratio after the tensile test.

The stress-strain diagrams of PLA samples with Octet, Gyroid, and Cross infill geometries depending on the change in porosity ratios are given in Figure 10, respectively. However, the sample's tensile modulus of elasticity was calculated by considering the elastic region in the stress-strain diagram. According to the infill geometry and porosity ratio, the modulus of elasticities were calculated as 37.70 MPa, 25.55 MPa, and 19.34 MPa in Cross infill samples, 34.13 MPa, 26.82 MPa, and 19.26 MPa in Gyroid infill samples, and 5.21 MPa, 4.87 MPa and 3.86 MPa in Octet infill samples, respectively, for 20%, 30%, and 50% porosity ratios. When the effect of the porosity ratio on the mechanical properties was evaluated, each sample's elasticity modulus decreased with increasing the porosity ratio from 20% to 50%. As mentioned in the literatures, these results showed that the tensile strength and modulus of elasticity decreased with decreasing density or increasing the pore ratio [19, 20], and indicated that the tensile behavior had a similar trend in different infill geometries. Besides, the elasticity modulus of Cross and Gyroid infill samples were higher than Octet infill samples at all porosity ratios.

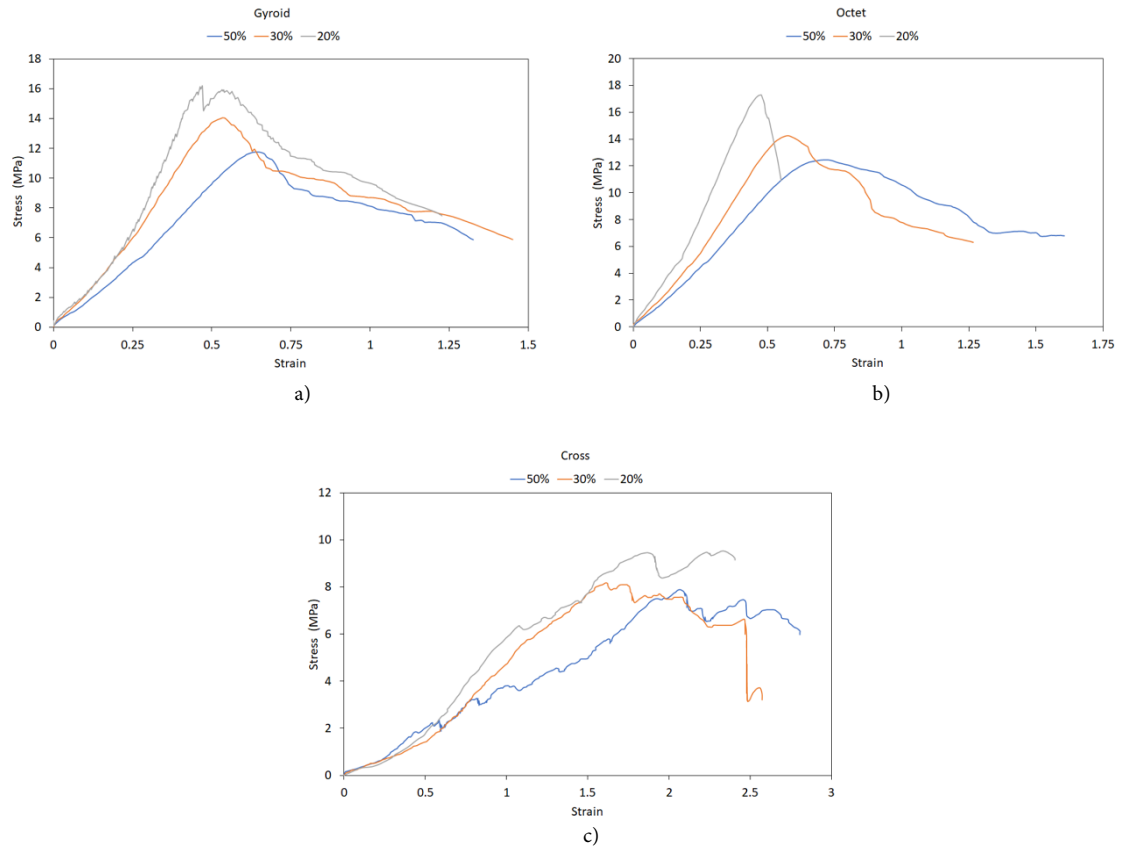


Figure 10. The effect of porosity ratio on tensile behavior of samples; a) Gyroid, b) Octet and c) Cross.

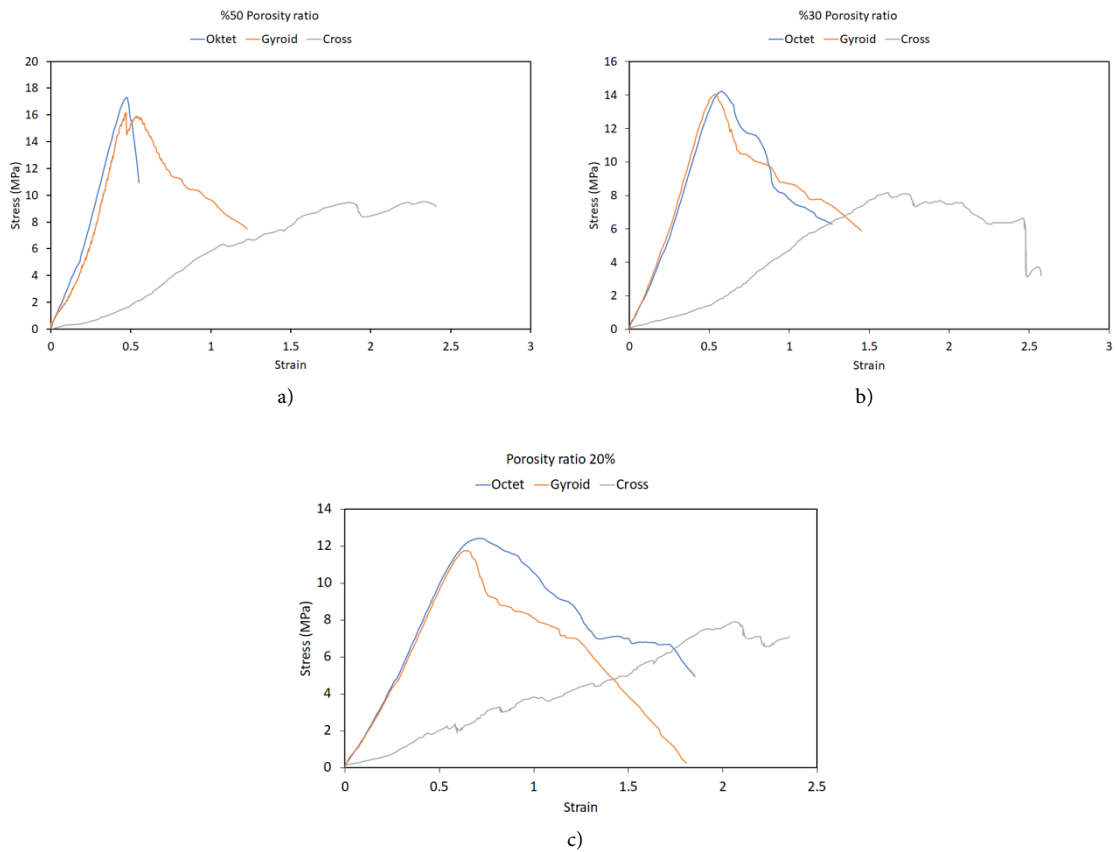


Figure 11. The effect of infill geometry on tensile behavior of samples; a) 50%, b) 30% and c) 20%.

Stress-strain diagrams in Figure 11 are given to evaluate the effect of infill geometry on tensile mechanical behavior of PLA specimens. When compared according to the infill geometry, it is seen that the Octet infill samples have the highest tensile strength in all porosity ratios. Slightly lower breaking stress values were obtained in the samples with Gyroid infill geometry compared to those with Octet infill geometry. However, while the lowest breaking stresses were obtained in Cross cell filled samples, higher deformations occurred compared to Octet and Gyroid infill samples.

4.3. Impact Test Results

The Charpy impact test was applied to the samples, prepared according to ISO 179 standard, to evaluate the effects of infill geometry and porosity ratio on the impact resistance in PLA-based parts. A 0.5 mm thick shell was formed on the sample's bottom, top, and side faces produced according to the standard, and the other two surfaces along the sample length were left open. The sample was positioned as Direction-1 and Direction-2 during the test according to the contact state of the hammer. In Direction-1 positioning, the sample is positioned so that its shell-covered face encounters the impact load of the hammer. However, in Direction-2 positioning, the sample is positioned so that its open face encounters the impact load of the hammer. The tests were carried out in two ways according to these directional positions. The appearances of the samples after the experiments are given in Figure 12.

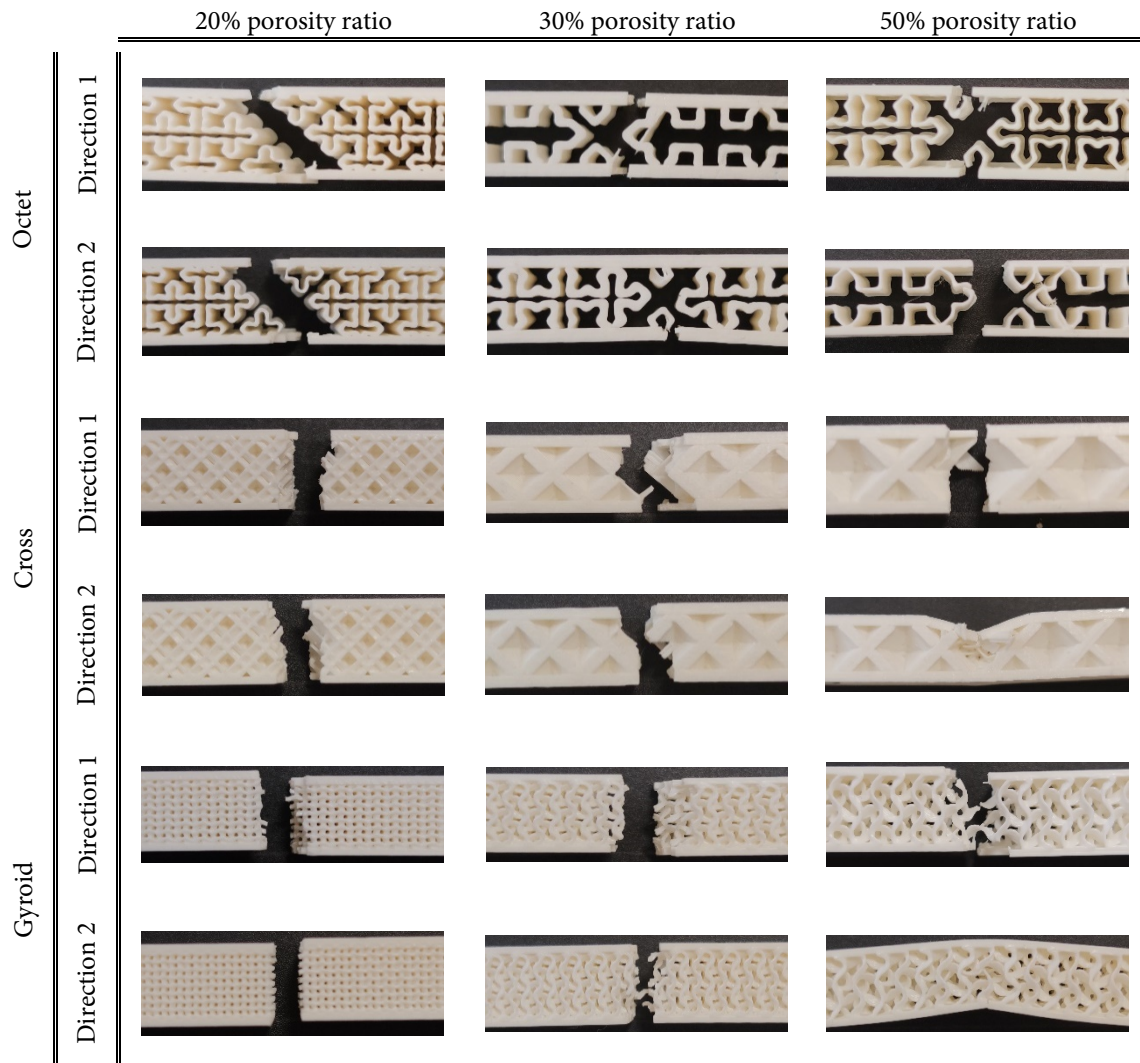
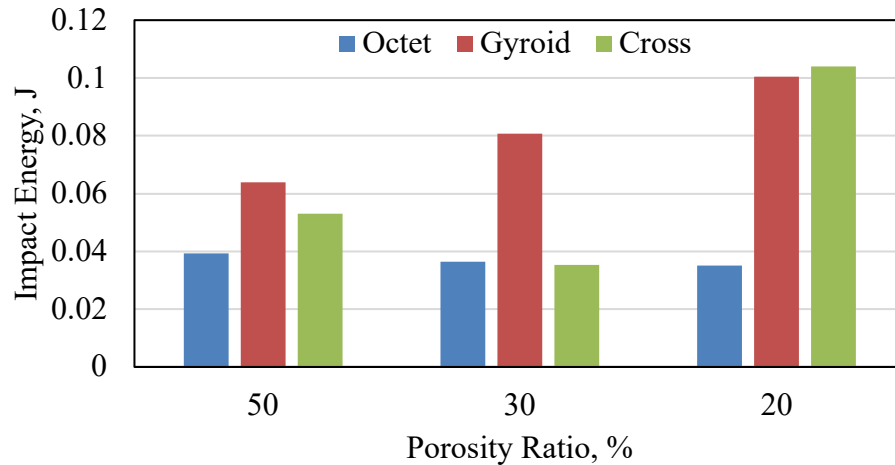


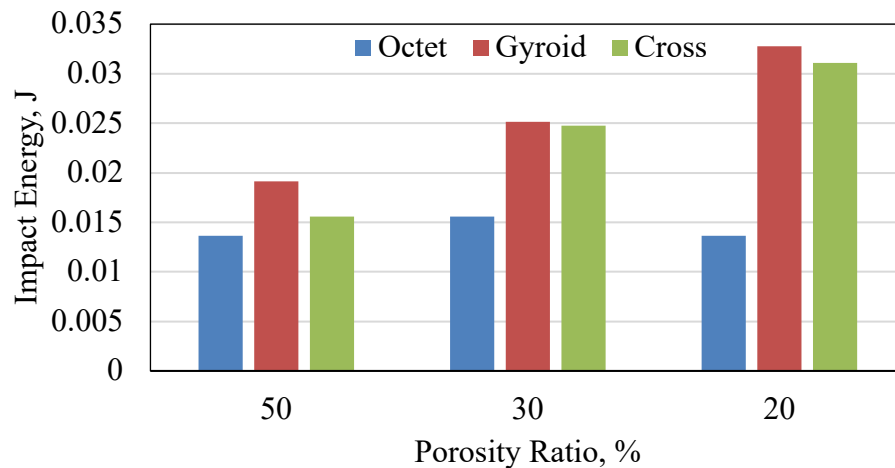
Figure 12. Views of the samples after the impact test

The impact resistances obtained when the samples are positioned as Direction-1 and Direction-2 are given in Figures 13a-13b, respectively. When the impact energies of the samples given in Figures 13a-13b are evaluated, the impact resistances of the Octet infill samples remain approximately the same. When the fracture pictures of the Octet samples obtained after the impact test were examined, the infill geometry could

not fulfill its task due to the insufficient connection between the infill patterns (Figure 12). This situation showed that the impact energy acting on the sample with Octet infill geometry was absorbed mainly by the sample's shell face. At the same time, it is seen that the breaks are not along a certain line. Thus, approximately the same impact energies were obtained. However, according to Figure 13, the impact resistances of the Gyroid infill samples increased as the pore ratio decreased. However, the impact resistances of Cross samples decreased by reducing the porosity ratio from 50% to 30% in Cross samples and then increased. In parallel with the literature [21], it was concluded that there is no linear relationship between the change in pore ratio and impact strength due to changing infill geometry.



a)



b)

Figure 13. Variation of impact energies with positioning samples for a) Direction 1, b) Direction-2

When the impact energies of the samples for Direction-2 are examined, it is seen that the impact resistances of the samples with Gyroid and Cross infill geometries decrease as the porosity ratio increases (Figure 13b). On the other hand, the impact resistances of the Octet infill samples remained approximately the same. However, it was determined that the impact resistances of Gyroid and Cross infill samples were higher than Octet infill samples at all porosity ratios. When a comparison is made in terms of the positioning of the samples as Direction-1 and Direction-2, it has been revealed that more impact energy can be absorbed in the Direction-2 positioning of the sample. In addition, it can be stated that the shell layer applied to the lower and upper surfaces of the samples increases the impact resistance. This result is attributed to the increasing density towards the sample surface as mentioned in the literature [22].

5. Conclusions

In this study, the mechanical behavior of PLA-based parts produced with three different infill geometries (Gyroid, Cross, and Octet) and porosity ratios (20%, 30%, and 50%) by FDM additive manufacturing method was investigated by applying tensile, compression and impact tests. The main findings obtained from the experimental studies, carried out per the related standards, are summarized below:

- When the compressive behavior of the samples was evaluated, increasing the porosity ratio decreased the compressive elasticity modulus and yield stress of the samples. However, each infill geometry showed different responses to compression load at the same porosity ratio.
- The lowest compressive elasticity modulus and yield stress were obtained in Octet infill geometry when the samples were compressed horizontally (perpendicular to the construction direction). When the samples were compressed vertically (in the direction of construction), the lowest compressive elasticity modulus occurred in the Cross infill geometry and the lowest yield stress in the Gyroid infill geometry.
- When the tensile behavior is examined, increasing the porosity ratio increases the tensile modulus of elasticity. The highest tensile strength and modulus of elasticity were obtained in Octet infill geometry. However, the lowest tensile strength, modulus of elasticity, and highest deformations were obtained in the Cross infill geometry.
- When an evaluation is made in terms of impact resistance, the impact resistance increases as the porosity ratio decreases in the structure with Gyroid infill geometry. The lowest impact resistance was obtained in all porosity ratios in samples with Octet infill geometry. In addition, it was observed that the shell structure, added to the outside of the samples, increased their impact resistances.

Acknowledgment

The authors would like to thank Karabük University Coordinatorship of Scientific Research Projects for the financial support with project number FDT-2020-2062. This research is supported in part by Karabük University.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] J. Wu, N. Aage, R. Westermann and O. Sigmund, "Infill Optimization for Additive Manufacturing-Approaching Bone-Like Porous Structures," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 24, no. 2, pp. 1127-1140, January 2017. doi:10.1109/TVCG.2017.2655523
- [2] L. Lu, A. Sharf, H. Zhao, Y. Wei, Q. Fan, X. Chen, Y. Savoye, C. Tu, D. Cohen-Or and B. Chen, "Build-to-last: Strength to weight 3D printed objects," *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 4, pp. 1-10, July 2014. doi:10.1145/2601097.2601168
- [3] W. Wang, T.Y. Wang, Z. Yang, L. Liu, X. Tong, W. Tong, J. Deng, F. Chen and X. Liu, "Cost-effective printing of 3D objects with skin-frame structures," *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, no. 6, pp. 1-10, November 2013. doi:10.1145/2508363.2508382
- [4] V.S. Deshpande, N.A. Fleck and M.F. Ashby, "Effective properties of the octet-truss lattice material," *J. Mech. Phys. Solids.*, vol. 49, no. 8, pp. 1747-1769, August 2001. doi:10.1016/S0022-5096(01)00010-2
- [5] L. Baich, G. Manogharan and H. Marie, "Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts," *Int. J. Rapid Manuf.*, vol. 5, no:3-4, pp 308-319, February 2016. doi:10.1504/ijrapidm.2015.074809
- [6] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz and A. Conejero, "Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing," *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 183-1923, September 2016. doi:10.1089/3dp.2015.0036
- [7] K.S. Kumar, R. Soundararajan, G. Shanthosh, P. Saravanakumar and M. Ratteesh, "Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. 2, pp. 2186-2191, May 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.078
- [8] S. Ganeshkumar, S.D. Kumar, U. Magarajan, S. Rajkumar, B. Arulmurugan, S. Sharma, C. Li, R.A. Ilyas and M.F. Badran, "Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3D-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS," *Materials*, vol. 15, no. 15, pp. 5142, June 2022. doi:10.3390/ma15155142

- [9] C. Lubombo and M.A. Huneault, "Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts," *Mater. Today Commun.*, vol. 17, pp. 214-228, December 2018. doi:10.1016/j.mtcomm.2018.09.017
- [10] A. Tsouknidas, M. Pantazopoulos, I. Katsoulis, D. Fasnakis, S. Maropoulos and N. Michailidis, "Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling," *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 41-44, July 2016. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.154
- [11] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma and H. Ouyang, "Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses," *Compos. Part B Eng.*, vol. 188, no. 107894, February 2020. doi:10.1016/j.compositesb.2020.107894
- [12] "Essentium High Performance PLA Additive Manufacturing Filament," MatWeb, October 2022. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/index.aspx>.
- [13] "Infill Pattern Comparison". Reddit, June 2020. [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/pdgbv0/infill_pattern_comparison/.
- [14] R. Yeşiloğlu, "Eklemeli İmalat İle Üretilen Farklı Dolgu Geometrisi Ve Yoğunluğa Sahip Pla Esaslı Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması," Y Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, 2022.
- [15] Z. P. Sun, Y. B. Guo and V. P. W. Shim, "Deformation and energy absorption characteristics of additively-manufactured polymeric lattice structures - Effects of cell topology and material anisotropy," *Thin-Walled Struct.*, vol. 169, no. 108420, December 2021. doi:10.1016/j.tws.2021.108420
- [16] A. Kumar, A. Kumar, A. Pandey, S. Sahu, N. Kumar and R. P. Singh, "Analysing the compressive behaviour of different PLA scaffolds fabricated through FFF process," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 402-415, Jul 2022. doi:10.1080/2374068X.2022.2093005
- [17] M. Alizadeh-Osgouei, Y. Li, A. Vahid, A. Ataee and C. Wen, "High strength porous PLA gyroid scaffolds manufactured via fused deposition modeling for tissue-engineering applications," *Smart Mater. Med.*, vol. 2, pp. 15-25, 2021. doi:10.1016/j.smaim.2020.10.003
- [18] H. Dou, W. Ye, D. Zhang, Y. Cheng and Y. Tian, "Compression performance with different build orientation of fused filament fabrication polylactic acid, acrylonitrile butadiene styrene, and polyether ether ketone," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, pp. 1925-1933, 2022. doi:10.1007/s11665-021-06363-2
- [19] M. Rismalia, S. C. Hidajat, I. G. R. Permana, B. Hadisujoto, M. Muslimin and F. Triawan, "Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material" *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1402, no. 4, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1402/4/044041
- [20] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar ve R. Kaçar, "PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, cilt 23, sayı 1, ss. 73-79, 2020. doi:10.2339/politeknik.422795
- [21] S. Korga, M. Barszcz and Ł. Zgryza, "The effect of the 3D printout filling parameter on the impact strength of elements made with the FDM method," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 710, 2019. doi:10.1088/1757-899X/710/1/012027
- [22] M.Q. Tanveer, A. Haleem and M. Suhaib, "Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: An experimental investigation." *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 1701, 2019. doi:10.1007/s42452-019-1744-1

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Fe Addition on High-Temperature Transformations of Specific Silica Sources

Cengiz Bağcı^{a,*}, Murat Zengin^b, Burak Kaya^c, Özgür Güven^d

Submitted: 07.02.2023 Revised: 19.04.2023 Accepted: 16.06.2023 doi:10.30855/gmbd.0705072

ABSTRACT

Keywords: Silica sand, rice husk, cristobalite, tridymite

^a Hitit University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering, 19030-Corum, Türkiye
Orcid: 0000-0001-9931-0778 e mail:
cengizbagci@gmail.com

^b Hitit University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering, 19030-Corum, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3980-1062

^c Hitit University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering, 19030-Corum, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6218-7021

^d Hitit University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering, 19030-Corum, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2969-2085

*Corresponding author:
cengizbagci@gmail.com

Anahtar Kelimeler: Silika kumu, pirinç kabuğu, kristobalit, tridimit

Alternative sources of silica, most abundant in the earth's crust, are converted into useful high-temperature crystalline phases. In this study, temperature dependent phase transformations of silica sand and rice husk sourced silica with and without the addition of 10 % by weight elemental iron were investigated. For this purpose, firstly, the initial silica sources were calcined at 700 °C for 2 hours, ground into fine powder and placed on a carbon substrate and heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in argon atmosphere. The phase transformation characteristics of the final material were made by XRD and SEM analysis. A mixture of cristobalite-tridymite and high purity cristobalite was observed in rice husk ash with and without Fe addition, respectively. In the same order, XRD phase pure tridymite and cristobalite phases were observed in silica sand. As a result, XRD phase pure or tailored transformations of these crystalline phases were obtained depending on the Fe addition and silica source.

Belirli Silika Kaynaklarının Yüksek-Sıcaklık Dönüşümlerinde Fe İlavesinin Etkisi

ÖZ

Alternatif silika kaynakları yer kabuğunda bol bulduklarından, yararlı yüksek sıcaklıkta kristal fazlara dönüştürülürler. Bu çalışmada, ağırlıkça % 10 elemental demir katkılı ve katkısız silis kumu ve pirinç kabuğu esaslı silislerin sıcaklığa bağlı faz dönüşümleri incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak başlangıç silika kaynakları 700 °C' de 2 saat kalsine edilmiş, ince toz haline getirilmiş ve bir karbon altlık üzerine yerleştirildikten sonra argon atmosferinde 1500 °C'de bir tüp fırında 2 saat ısıtılma tabii tutulmuştur. Nihai malzemenin faz dönüşüm karakteristikleri XRD ve SEM analizi ile yapılmıştır. Fe katkılı ve katkısız pirinç kabuğu külünde sırasıyla bir kristobalit-tridimit karışımı ve yüksek saflıkta kristobalit gözlenmiştir. Aynı sıra ile silis kumunda XRD faz saf tridimit ve kristobalit fazları gözlenmiştir. Sonuç olarak, Fe katkısına ve silis kaynağına bağlı olarak bu kristal fazların XRD faz saf veya uyarlanmış dönüşümleri elde edilmiştir.

1. Introduction

Following oxygen, silicon is the most abundant element in the earth's crust and together they form silica. Containing a minimum 98 % SiO_2 , silica sand is a hard mineral that is very resistant to temperature and chemical effects [1]. Because of these intrinsic properties, it is always used in different industries, for example, on the floors where heavy equipment is working, where high abrasion resistance is required, it is used safely in construction and in the production of building chemical materials due to its structure that is not affected by acids [2]. Rice is one of the most important food sources in the world, 72 % of which is consumed by humans and then the husk remains as natural waste. Rice husk contains silica (70-90 %) depending on the geography and climatic conditions where the rice is grown. The type and amount of silica in the husk depend on the calcination temperature and time. Rice husk ash is obtained by burning rice husk at temperatures over 500 °C and contains a little carbon of organic origins. It is used as a source of silica in the production of geopolymer [3], concrete or high-temperature composites and ceramics such as SiC [4], Si_3N_4 [5]. Silica is a polymorph material that can change its molecular structure with temperature. Silica, which is in the form of crystalline quartz at low temperatures, transforms into the crystalline tridymite phase at 870 °C and forms cristobalite at around 1470 °C [6-8]. These refractories can be effectively utilized in various areas such as glass, paints, ceramics, plastics, and construction products [9, 10].

In terms of contributing to the circular economy with a sustainable and waste-reducing approach, these two silica resources can be effectively used in the transformation of these useful refractories. There is limited study in literature directly related to the current study; however, the addition of iron was reported as 3-17 wt. % in a related study [11]. 10 % wt. iron addition was fixed, considering that the low amount of iron would act as a trace metal and the excess amount of iron would promote single-phase cristobalite conversation [12, 13]. In this study, temperature-dependent phase transformations of silica sand and rice husk-sourced silica with and without the addition of 10 % by weight elemental iron were investigated.

2. Materials and Methods

Silica sand and rice husk used as local silica sources in this study were obtained from Samsun and Osmancık, respectively. Elemental Fe was used as the catalyst and graphite plate was used as the substrate. First, both silica sources were calcined at 700 °C for 2 hours in an open-air furnace to remove possible organic compounds. Following the calcination, they were ground into powders in a mortar and pestle and subsequently sieved to 63 μm particle sizes. With their use without additives, the initial samples were homogenized in a planetary ball mill (Fritsch Pulverisette 7) with YSZ (ZrO_2 and Y_2O_3) vessel and balls by adding elemental Fe 10 % to both silica sources. The designed samples are based on silica sand (SS) and rice husk ash (RHA) deemed as SS-0, SS-10, RHA-0, and RHA-10. Simultaneously, surface cleaning processes of graphite substrates were carried out in Daihan Wish WUC-D22H brand ultrasonic bath device. The heat treatment of the samples was carried out in the PTF 16/75/450 model atmosphere-controlled tube furnace. 0.5 grams of powder was taken from each sample and placed on the graphite substrate in such a way that they do not come into contact with each other, and then the substrate was inserted in the center of the furnace where the temperature changes were the least, and the lids of the tube were closed (Fig. 1a). The heat treatments were carried out by providing a continuous flow of argon gas from the tube within the program including two isothermal soaks at 750 °C and 1500 °C for 0.5 and 2 h in Fig. 1b, respectively.

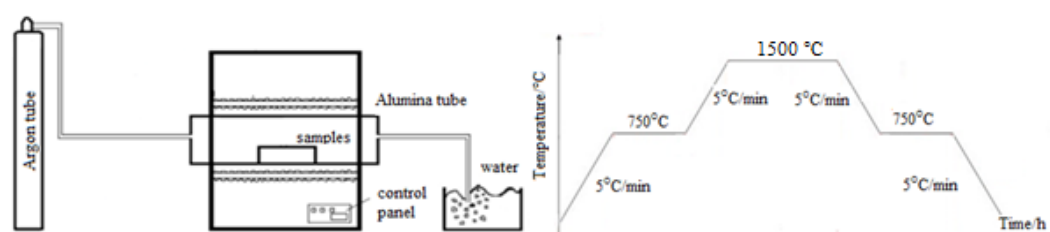


Figure 1. Tube furnace set-up and heat-treatment program.

Following the reaction products were ground into a fine powder, and the EMPYREAN diffractometer ($\lambda = 0.15418$ nm, mean of λ_1 and λ_2) equipped with a $\text{CuK}\alpha$ source was analyzed by PANalytical X-ray diffraction. The tests used a voltage of 40 kV, a current of 30 mA, a rise of 0.02, (2θ), a Bragg angle from 10° to 80° (2θ), and a scan rate of 1°/min. The resulting peaks were defined manually by matching with single Jade

9 software. Microstructure images of the synthesized powders (Quanta 450 SEM) were obtained by scanning electron microscope at 25K magnification, 10-20 kV voltage range, and high vacuum and with a secondary electron detector. Crystallite sizes of transformed phases calculated considering the XRD peak of every converted phase by the Debye Scherrer equation $D=0.9 \lambda/(\beta_{1/2} \cos \theta)$, where λ =X-Ray wavelength, $\beta_{1/2}$ =calculated with half-maximum of the strongest peak, θ =diffraction angle and d = crystallite size.

3. Results and Discussion

Fig. 2 shows the XRD pattern of all the samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in a flowing argon atmosphere. Morphological and chemical content characterizations of the rice husk used in this study by SEM-EDS before and after calcination were reported in our most recent study [4]. In EDS analysis, while silicon and oxygen constitute the majority of the chemical content by weight percent, 5 % potassium and carbon were found as the most following content and the rest consists of trace elements. It has also been evaluated in other studies that surface oxides formed during calcination cause carbon that has not been removed from the rice husk ash [14]. However, it is seen that the unburned carbon in the final product is completely removed from the structure upon heating at 1500 °C for 2 hours after calcination in the current study. A mixture of both cristobalite and tridymite polymorphs is seen in sample RHA-10. Here, it is concluded that iron inhibits cristobalite formation in a limited way. Fibrous rice husk was able to ground into a finer grain size than silica sand, which has a Mohs hardness of around 7 after calcination with pestle and mortar.

Therefore, the high surface area of rice husk allowed a high iron-derived liquid phase on the surface of the grains, partially preventing cristobalite formation. In the rice husk sample without iron addition, RHA-0, severe XRD phase pure cristobalite peaks were observed. Tridymite nearly transforms into cristobalite at 1470 °C with polymorphic transformation seen between (25-30°)=2-theta in the RHA-0 sample [15].

XRD phase pure tridymite formation with a total of four main characteristic peaks, three between 20°-30° 2-theta and one with 36° 2-theta is observed as a result of XRD performed after heat treatment of SS-10 sample [16]. In the case of SS-0 without iron addition, cristobalite formation, which is a high-temperature polymorph of silica, shifts the tridymite peaks to cristobalite. This can be explained by the fact that the addition of iron in the SS-10 sample forms a eutectic phase due to high-temperature heat treatment and predominantly prevented the formation of cristobalite. In addition to the cristobalite form of silica, some graphite peaks originating from the graphite substrate are also observed in the SS-0 sample. The structural integrity of the graphite substrate is disrupted by high temperatures, and efflorescence occurs on its surface that can easily diffuse to the samples on it. These degradations were easily seen from the naked eye inspection of the graphite substrate after the experiment.

Since iron differently inhibited cristobalite formation in both silica sources, this resulted in the formation of mixed structures of cristobalite and tridymite in different amounts. Depending on the desired properties of the resulting material, the starting composition and heat treatment can be designed.

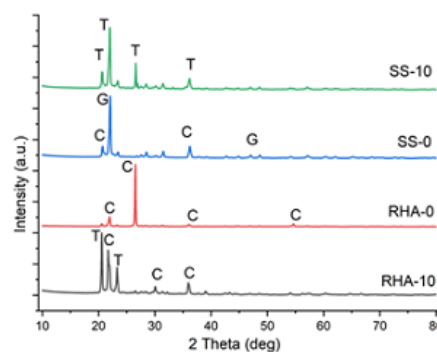
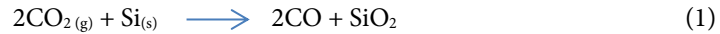


Figure 2. XRD patterns of SS-0, SS-10, RHA-0, RHA-10 samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in argon atmosphere. C: Cristobalite, T:Tridymite, G:Graphite).

The SEM micrographs of RHA-0 and RHA-10 samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in an argon atmosphere are shown in Fig 3. The general microstructure in Fig 3a is mainly composed of

hexagonal particles ascribed to typical tridymite formation consistent with XRD (a crystallite size 3.62 at $2\theta=20.57$) results in Fig. 2 [17]. On the other hand, with the effect of 10 percent iron addition, some of the hexagonal particles grew into fibers having 10 μm in width and about two micrometers in length (Fig 3b) [13, 19]. The formation mechanism of SiO_2 fibers could be expressed by the following reaction;



Fiber formation with high a aspect ratio depends on a catalyst-assisted vapor-liquid-solid mechanism [20]. In the current study iron promoted to increase the fiber formation by playing as a catalyst. Fig 3c reveals a homogeneous tailored morphology of traditional hexagonal prismatic, leaf-like and lath-shaped of cristobalite with a crystallite size of 4.63 at $2\theta=26.53$. The hexagonal grains are approximately 20 μm in size and there are leaf-like and lath-shaped particles of 1-2 μm both sizes, which are relatively regularly distributed in the main hexagonal structure [21]. The shapely tailored morphology can contribute to the strength of the ceramic materials to be produced from these powders by creating a driving force for sintering due to the structural difference, both in this way and in terms of increasing the fracture toughness of the lath-shaped parts in the structure [22].

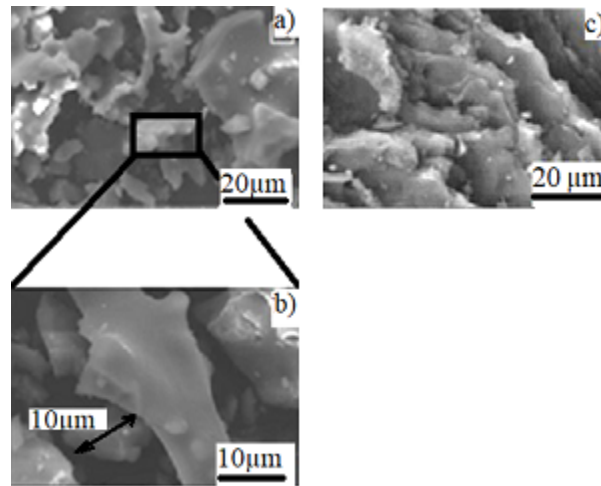


Figure 3. (a) General SEM micrographs of RHA-10, b) high magnification image of fibrous, (c) RHA-0 samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in an argon atmosphere.

Fig. 4 depicts the SEM micrographs of SS-0 and SS-10 samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in an argon atmosphere. By the evaluation made in the XRD analysis (Fig.2), it is seen that the microstructure consists of coarser crystals when compared to the powders synthesized from rice husk in the general image the Fig 4a. From the magnified image in Fig. 4b, it is deduced that the grains are about 100 microns and about 10 times larger than the sizes of the powders synthesized from this rice husk [23]. Similar to powders synthesized from rice husk, hexagonal and fiber-shaped bimodal morphology is observed. This is consistent with the detection of tridymite-cristobalite with a crystallite size of 2.56 at $2\theta=21.97$ in XRD analyses. The addition of iron could not complete the tridymite-cristobalite transformation due to its coarse structure, and this allowed mixing the structure as a phase as well as shape tailoring [24]. Long enough fibers with a width of 20 μm in the structure can be effective in the crack deflection mechanism in the ceramic material to be produced from these powders [25]. A more uniform structure consisting of coarse agglomerated and fine spherical-shaped particles is seen in Fig. 4c and this structure is adjusted to phase pure cristobalite as seen from the XRD analysis with a crystallite size 2.81 at $2\theta=22.03$.

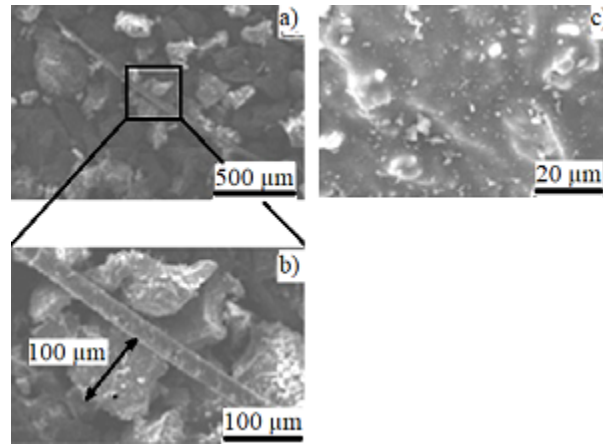


Figure 4. (a) General SEM micrographs of SS-10, b) high magnification image of fibrous, (c) SS-0 samples heat treated in a tube furnace at 1500 °C for 2 hours in an argon atmosphere.

4. Conclusion

As a result, it was observed that the addition of elemental iron had different effects on the high-temperature transformations of silica sand and rice husk ash. While the Fe-added silica sand sample resulted in phase pure tridymite, the non-added silica sand ash resulted in a mixture of cristobalite and graphite. On the other hand, the tridymite-cristobalite binary structure was obtained from the iron-added rice husk ash, while phase pure cristobalite was obtained from the non-added. While iron provides phase pure tridymite transformation in rice husk ash due to its fine grain size, a binary structure is achieved in coarse-grained silica sand due to the incomplete tridymite-cristobalite transformation. The presence of phase in the resulting material can be controlled by adding iron to the initial silica sources. In addition to its environmentally friendly approach to waste reduction, the tailored refractories synthesized in this study are proposable for various industries such as glass, paints, ceramics, plastics, and construction products.

Acknowledgment

The study was carried out in the laboratories of the Department of Metallurgical and Materials at Hitit University.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] R. Ratnawulan, A. Fauzi and A. E. S. Hayati, "Characterization of silica sand due to the influence of calcination temperature," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 335 no. 1, pp. 012008, 2018. doi:10.1088/1757-899X/335/1/012008.
- [2] N. Soltani, A. Bahrami, M. I. Pech-Canul and L. A. González, "Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials," *Chemical Engineering Journal*, vol. 264, pp. 899-935, 2015. doi:10.1016/j.cej.2014.11.056
- [3] U. H. Heo, K. Sankar, W. M. Kriven and S. S. Musil, "Rice husk ash as a silica source in geopolymer formulation," *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, vol. 38, no. 10, pp. 87-102, 2015. doi:10.1002/9781119040293.ch7
- [4] C. Bagci, K. Karacif, B. Alkan and H. Arik, "The use of rice husk ash-based SiC particles as reinforcement in geopolymer composites," *Journal of Polytechnic*, (early view), 2023. doi:10.2339/politeknik.1130886
- [5] S. S. Hossain, L. Mathur and P. K. Roy, "Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 6, no. 4, pp. 299-313, 2018. doi:10.1080/21870764.2018.1539210
- [6] P. J. Heaney, "Structure and chemistry of the low-pressure silica polymorphs", silica physical behaviour," *Geochemistry and Materials Applications*, vol. 29, pp. 1-32, 1994. doi:10.1515/9781501509698-006
- [7] T. Demuth, Y. Jeanvoine, J. Hafner and J. G. Angyan, "Polymorphism in silica studied in the local density and generalized-gradient approximations," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol.11, pp 3833-3874,1999. doi:10.1088/0953-8984/11/19/306

- [8] K. Mohanta and P. Bhargava, "Effect of milling time on the rheology of highly loaded aqueous-fused silica slurry," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 91, no. 2, pp 640–643, 2008. doi:10.1111/j.1551-2916.2007.02153.x
- [9] X. Yang, D. Lu, B. Zhu, Z. Sun, G. Li, J. Li, Q. Liu and G. Jiang, "Phase transformation of silica particles in coal and biomass combustion processes," *Environmental Pollution*, vol. 292, pp. 118312, 2022. doi:10.1016/j.envpol.2021.118312
- [10] M. J. Kaleli, P. K. Kamweru, J. M. Gichumbi and F. G. Ndiritu, "Characterization of rice husk ash prepared by open air burning and furnace calcination," *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, vol. 11, no. 2, pp. 24-30, 2020. doi:10.5897/JCEMS2020.0348
- [11] K. N. Maamur, U. S. Jais, and S. Y. S. Yahya, "Magnetic phase development of iron oxide-SiO₂ aerogel and xerogel prepared using rice husk ash as precursor," In AIP Conference Proceedings, vol. 1217, no. 1, pp. 294-301, 2010,. doi:org/10.1063/1.3377832
- [12] N. P. Hoolikantimath, K. G. Guptha, R. K. Rao and P. A. Ghorpade, "Effect of temperature on sodium silicate bonded sand and its phase transformations to cristobalite in metal casting industry," *JOM*, vol. 74, no. 2, pp. 465-473, 2022. doi:10.1007/s11837-021-05056-4
- [13] N. P. Hoolikantimath, S. Dodamani, K. G. Guptha, R. K. Rao and P. A. Ghorpade, "Influence of metal casting temperature and cations on phase transformation of silica sand to cristobalite," *International Journal of Metalcasting*, pp. 1-12. 2022. doi:1007/s40962-022-00921-7
- [14] S. A. Saad, A. N. Jamaluddin, S. A. Masjuki, S., Beddu and N. Shafiq, "Influences of grinding process on the physical and morphological characteristics of ultrafine treated rice husk ash," *Geomate Journal*, vol. 23, no. 97, pp. 74-81, 2022. doi:10.21660/2022.97.3117
- [15] Y. Shinohara and N. Kohyama "Quantitative analysis of tridymite and cristobalite crystallized in rice husk ash by heating," *Industrial health*, vol. 42, no. 2, pp. 277-285, 2004. doi:10.2486/indhealth.42.277
- [16] U. Nurbaiti and S. Pratapa, "Synthesis of cristobalite from silica sands of Tuban and Tanah Laut," In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 983, no. 1, pp. 012014, 2018. doi:10.1088/1742-6596/983/1/012014
- [17] R. D. Febo, L. Casas, Á. A. del Campo, J. Rius, O. Vallcorba, J. C. Melgarejo and C. Capelli, "Recognizing and understanding silica-polymorph microcrystals in ceramic glazes," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 15, pp. 6188-6199, 2020. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.063
- [18] A. T. Vu, T. N. Xuan and C. H. Lee, "Preparation of mesoporous Fe₂O₃-SiO₂ composite from rice husk as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for degradation of organic dyes," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 28, pp.169-180, 2019. doi:10.1016/J.JWPE.2019.01.019
- [19] V. Erofeev, A. Yusupova and A. Bobrishev, "Activation of sulfur and opal-cristobalite-tridymite phase in sulfur concrete technology," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 463, no. 4, pp. 042033, 2018. doi:10.1088/1757-899X/463/4/042033
- [20] S. Pukird, P. Chamninok, S. Samran, P. Kasian, K. Noipa and L. Chow, "Synthesis and characterization of SiO₂ nanowires prepared from rice husk ash," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 19, no. 2, pp. 33-37, 2009.
- [21] A. Gupta, V. Pandey, M. K. Yadav, K. Mohanta and M. R. Majhi, "A comparative study on physio-mechanical properties of silica compacts fabricated using rice husk ash derived amorphous and crystalline silica," *Ceramics International*, vol. 48, no. 23, pp. 35750-35758, 2022. doi:10.1016/j.ceramint.2022.07.098
- [22] F. Z. Sobrosa, N. P. Stochero, E. Marangon and M. D. Tier, "Development of refractory ceramics from residual silica derived from rice husk ash," *Ceramics International*, vol. 43, no. 9, pp. 7142-7146, 2017. doi:10.1016/j.ceramint.2017.02.147
- [23] Zainuri, M. "Synthesis of SiO nanopowders containing quartz and cristobalite phases from silica sands," *Materials Science-Poland*, vol. 33, no. 1, pp. 47-55, 2015. doi:10.1515/msp-2015-0008
- [24] S. Kwon, Y. Kim and Y. Roh, "Effective cesium removal from Cs-containing water using chemically activated opaline mudstone mainly composed of opal-cristobalite/tridymite (opal-CT)," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1-15, 2021. doi:10.1038/s41598-021-94832-y
- [25] X. H. Zhang, Y. Li, Z. H. Tian, Y. Sun, C. H. Ma and Q. Y. Zheng, "Transformation mechanisms of cemented silica and crystalline silica to tridymite in silica bricks," *Inter-ceram-International Ceramic Review*, vol. 71, no. 3, pp. 20-29, 2022. doi:10.1007/s42411-022-0505-0



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Statistical Evaluation of the Screw Pull Out Forces of PLA Parts Manufactured by Fused Deposition Modeling

Ahmet Murat Pinar^a, Berkay Ergene^b, Gökmen Atlıhan^c, Ahmet Arif Mağatlı^d, Fırat Kaya^e, Burak Karahan^f, Mehmet Emir Nişancı^g

Submitted: 22.03.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 07.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705073

ABSTRACT

In this study, the effects of multiple printing parameters on the screw pull out force of PLA samples produced with a 3D printer were investigated statistically. Based on the Taguchi L27 orthogonal array, tests were carried out at different levels of printing speed, printing temperature, infill density, build plate temperature and infill pattern factors. Experiment results were assessed at the 95 % confidence level with analysis of variance, main effects and interaction graphs. Thus, the effects of factors and some two-way interactions on the screw pull out force and the levels that give the optimum response are determined. Accordingly, it is obtained that only the printing temperature, infill rate, infill pattern and printing temperature-fill rate factors and interactions are significant; It is also found that the infill density has the highest effect on the holding force with 55.08 %, followed by the printing temperature (18.62 %), printing temperature-infill density (12.19 %) and infill pattern (4.03 %). Finally optimum pull out force is predicted at the second level of printing speed ($A_2= 50$ mm/s), third level of printing temperature ($B_3= 230$ °C), third level of infill density ($C_3=100$ %), third level of build plate temperature ($D_3=80$ °C) and the first level of infill pattern ($E_1=$ Grid) as 1885.89 N. In 3 confirmation experiments performed at these levels, an average pull out force of 1993.33 N is obtained and it is determined that the result was within the specified confidence interval. Thus, the optimization made is of sufficient accuracy.

Eriyik Yığma Modelleme ile Üretilen PLA Parçaların Vida Tutma Kuvvetlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

ÖZ

Bu çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen PLA numunelerin çoklu yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri istatistiksel olarak araştırılmıştır. Taguchi L27 Ortogonal dizi esas alınarak, yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni faktörlerinin farklı seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, varyans analizi, ana etkiler ve etkileşim grafikleri ile % 95 güven seviyesinde değerlendirilmiştir. Böylece faktörlerin ve bazı etkileşimlerin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri ve optimum cevabı veren seviyeler belirlenmiştir. Buna göre sadece yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimlerinin anlamlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) faktör ve etkileşimlerinin izlediği gözlemlenmiştir. Son olarak, optimum tutma kuvveti yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= % 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir. Bu seviyelerde gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneyinde, ortalama 1993.33 N'luk tutma kuvveti elde edilmiş olup, sonucun belirlenen güven aralığında olduğu tespit edilmiştir. Böylece yapılan optimizasyonun yeterli doğrulukta olduğu söylenebilir.

Keywords: Fused deposition modelling, Additive manufacturing, Optimization, Taguchi method, Screw pull out force

^a Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0721-6723
e mail: apinar@pau.edu.tr

^b Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6145-1970

^c Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0599-525X

^d Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0007-1041-5970

^e Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0005-7560-4428

^f Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0008-0222-7918

^g Pamukkale University, Technology Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 20160 - Denizli, Türkiye
Orcid: 0009-0007-7057-9627

*Corresponding author:
apinar@pau.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Eriyik yığma modelleme, Katmanlı imalat, Optimizasyon, Taguchi method, Vida tutma kuvveti

1. Giriş (Introduction)

Mevcut katmanlı (eklemeli) üretim metotları içinde üretim cihazlarının kullanılabilirliğinin yanı sıra malzeme temininin de kolay olması nedeniyle eriyik yığıma modelleme (EYM) sıklıkla tercih edilmektedir [1, 2]. Bu yöntemde filament adı verilen kompozit esaslı ya da saf termoplastik polimer, zıt doğrultuda döndürülen iki diskten geçerek bir rezistansa yönlendirilir. Eriyik haldeki polimer, itme kuvvetinin etkisiyle nozul çapına düşürülerek imalat tablasına akıtılır. Böylelikle, malzemenin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesiyle parça üç boyutlu olarak üretilmiş olur. Eklemeli imalat geleneksel üretim teknikleriyle mukayese edildiğinde, atık malzeme miktarının azlığı, nispeten daha düşük ücretle prototip oluşturma, çoğunlukla ikincil işlemlere gerek kalmadan parçanın tek seferde kolayca oluşturulması gibi çeşitli avantajlara sahiptir [3-5]. Bu avantajlarının yanı sıra, eklemeli üretim geleneksel imalat tekniklerine göre anlamlı kılan en önemli özellik, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi oldukça zahmetli veya olanaksız olan, karmaşık şekillere sahip özellikle otomotiv, biyomedikal, havacılık ve mimari alanındaki parçaların kolaylıkla üretebilmesidir [6-8]. EYM teknolojisi kabaca şu adımlardan oluşmaktadır: Parçanın bir CAD programında oluşturulup STL formatında kaydedilmesi; dilimleyici yazılımıyla baskı parametrelerinin belirlenip 3B yazıcının kontrol ünitesine uygun G kodlara dönüştürülmesi; ve bu kodları içeren parça NC dosyasının 3B yazıcıya yollanıp parça basım işleminin gerçekleştirilmesi. Dilimleyici yazılımla belirlenen baskı parametreleri, parçanın kalitesini, mekanik özelliklerini ve üretim süresini direkt olarak etkilemekte olup, büyük önem arz etmektedir. Aşağıda bu alanda yapılan çalışmalar özetlenmektedir.

Ercan ve Yunus [5] PLA (Polilaktik asit) malzemeyi kullanarak 6 farklı dolgu deseninde sandviç panel üretimini gerçekleştirmişler ve bunlara ait maksimum basma gerilmesi değerleri ve elastisite modüllerini karşılaştırmışlardır. Chaidas vd. [9] PLA yazdırma sıcaklığının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü, maksimum profil yüksekliği ve RMS pürüzlülük parametrelerinin farklı sıcaklık değerlerindeki değişimleri değerlendirilmiştir. Günay vd. [10] EYM yöntemi ile üretilen PLA+ numunelerin 3 farklı doluluk oranı ve iki farklı tarama açısındaki çekme ve eğme dayanımlarını araştırmışlardır. Buna göre, 3B yazıcı ile sabit üretim hızı (60 mm/s), 3 değişik doluluk oranı (% 50, % 75 ve % 100) ve 2 farklı tarama açısında (-45/+45° ve 0/90°) standarda uygun çekme ve eğme test numuneleri hazırlamışlardır. Deney numunelerini standart çekme cihazında üç nokta eğme ve çekme testine tabi tutarak, deneysel sonuçları değerlendirmişlerdir. Aydın vd. [11] 3B yazıcı ile üretilen PLA numunelerinde, yazdırma sıcaklığı (190 °C, 200 °C, 210 °C ve 220 °C) ve yazdırma hızı (30, 50 ve 70 mm/saniye) parametrelerinin reolojik özelliklerini, sertlik ve çekme performanslarını çalışmışlar, ve sistemin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tokdemir vd. [12] 3 farklı markaya ait ahşap katkılu PLA filament kullanarak, 2 farklı katman kalınlığı, 2 farklı duvar kalınlığı ve 2 farklı doldurma oranında üretilen numunelerin çekme mukavemetlerini gözlemlemişlerdir. Altun vd [13], [12] no'lu yayında belirtilen aynı malzeme ve parametreleri kullanarak, bunların yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Günay vd. [14] 3B yazıcı ile üretilen PLA+ parçaların çekme mukavemetini Taguchi yöntemi ile optimize etmişlerdir. L18 deney tasarımı esas alınarak, farklı yazdırma hızı, doluluk oranı ve tarama açıları seviyelerinde gerçekleştirilen testler, varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Menderes vd [15] 3B yazıcı ile imal edilen Polietilenterfatat Glikol (PET-G) numunelerin farklı dolgu deseni ve üst katman sayısında gerçekleşen basım işlemlerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirmişler ve bunların yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise, Ergene vd. [16] PET-G malzemedeki EYM ile ürettikleri konik açılı kirişlerin titreşim özelliklerini hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi yardımı ile tespit etmişlerdir. Ergene ve Çağın [17] ise, PET-G malzemedeki üretilen yapıların çekme özelliklerini farklı çekme hızlarında deneysel olarak incelemişlerdir.

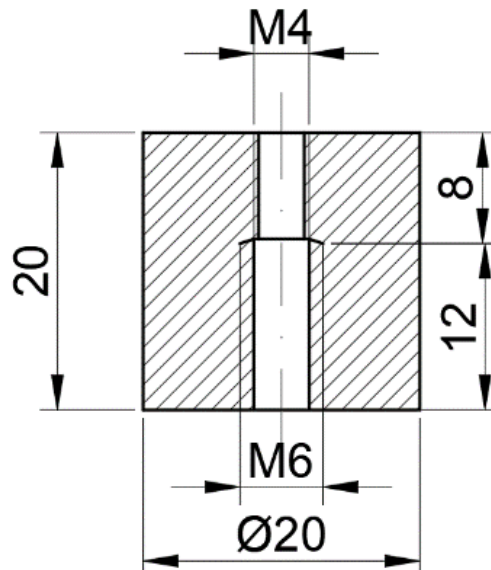
Diğer yandan polimer malzemelere ait vida tutma performansına ait çalışmalar aşağıda değerlendirilmiştir. Zeren ve Maral [18], orta yoğunluklu polietilen numunelerin farklı termal çevrim ve çevre koşullarındaki vida tutma performansını araştırmışlardır. Bu amaçla numuneler farklı çevre koşulları için 5 guruba ayrılmış olup, cam kaptaki 1 ay süreyle bekletilmiştir. Buna göre birinci grup 20 °C'deki suda, ikinci grup, 60 °C'de suda, üçüncü grup 20 °C'de NaCl ile doymuş suda, dördüncü grup 60 °C'de NaCl ile doymuş suda, beşinci grup 60 °C'de kuru ortamdaki fırında bekletilmiştir. Tüm numuneler M4 civata ile boydan boya olacak şekilde vidalanmıştır. Buna göre sulu ortamdaki numunelerin vida tutma dayanımının arttığı, doymuş NaCl suyuna batırılan numunelerin vida sıyırma performansının, suya batırılan numunelere göre daha düşük olduğu ve genel olarak vida tutma kuvvetinin sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği elde edilmiştir. Ünal [19] cam elyaf takviyeli polimer kompozit numunelerin metrik, yuvarlak testere, trapez ve kare profilli civata bağlantılarındaki vida tutma kuvvetlerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Buna göre tüm vidaların dış üstü çapları ve adımları sırasıyla 16 ve 2mm olarak alınmıştır. Yapılan, test ve analiz

sonuçlarında metrik diş profiline sahip vidanın vida tutma performansının daha iyi olduğu saptanmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Yu vd. [20], demiryolu traversleri için üretilen ahşap, sentetik kompozit, geri dönüştürülmüş plastik ve partikül dolgu reçine numunelerin GageLok-5 vida rayı civatası ile bağlantılarına ait vida tutma mukavemeti ve delik mikro yapısı üzerinden hasar analizini incelemişlerdir. Ayrıca malzeme özelliklerinin vida tutma dayanımı ve kırılma davranışı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Buna göre, farklı travers malzemeleri arasında vida tutma dayanımında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu ve malzemelerin kayma mukavemeti ile vida tutma mukavemeti arasında yüksek bir korelasyon olduğunu tespit etmişlerdir. Kubiak vd. [21] bir çift çekirdekli pedikül civatasını ve ticari olarak temin edilebilen bir silindirik pedikül civatasının vida tutma mukavemetini, üç farklı yoğunluktaki (0,16, 0,32 ve 0,64 g/cm³) poliüretan köpük malzeme üzerinde test etmişlerdir. Çift çekirdekli pedikül vidaların tüm poliüretan köpük malzemeler için düz silindiriklere göre daha yüksek tutma kuvveti performansı gösterdikleri elde edilmiştir. Einafsar vd. [22] farklı matkap çaplarına sahip 20 adet konik çekirdekli titanyum civatayı yüksek yoğunluklu polietilen bloklara vidalamışlardır. Montaj esnasında her civata için maksimum torku kaydetmişlerdir. Bu işlemi takiben kemik vida yapısının doğal frekansını ölçmek için ivme ölçer ve akustik modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Son olarak da tahribatlı çekme testinden vida tutma kuvveti, yer değiştirme ve enerji dağılımı verilerini elde etmişlerdir. Matkap çapı ile vida tutma kuvveti ve torkun ters orantılı olarak değiştiğini yüksek korelasyonda elde etmişlerdir. Einafsar vd. [23] iki farklı gözenekli yapıya sahip poliüretan köpük ve yüksek yoğunluklu polietilen numuneler üzerinde vida tutma testleri gerçekleştirmişlerdir. Kırkbeş adet titanyum pedikül vidası her bir malzemede 10, 20 ve 30 mm derinlikte vidalanmış olup, bunlara ait katılık, akma kuvveti, vida tutma kuvveti ve yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Serbest gerilimli ve ön gerilimli olmak üzere iki farklı durum için homojenleştirilmiş sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek deneysel verilerle mukayese etmişlerdir.

Yukarıdaki veriler ışığında, 3B yazıcılarla üretilen polimer malzemelerin birçok mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri incelenirken vida tutma kuvvetlerinin belirlendiği bir çalışmaya ulaşılammıştır. Buna karşın, önerilen çalışmada, literatürde önemli bir eksikliği giderecek, yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

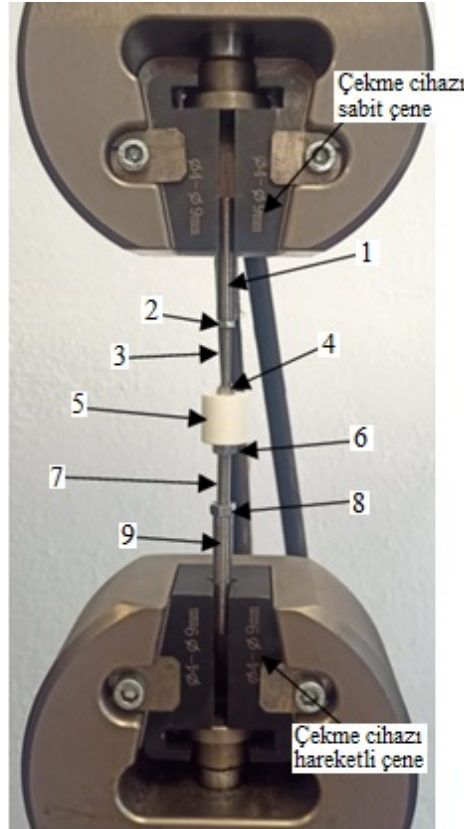
2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Yapılan fizibilite ve pilot test çalışmalarının bir sonucu olarak PLA deney numunesi boyutları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numunelere ait ölçüler (Dimensions of samples)

Numunelerin ölçümü öncesinde, Şekil 2'de verilen ölçüm düzeneğinin imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Vida tutma kuvveti ölçüm düzeneği (Screw pull out force measurement system)

Deney düzeneği toplamda 9 parçadan oluşmaktadır (Şekil 2). Bunlar 1: Üst bağlantı parçası; 2: Üst bağlantı parçası ile üst bağlantı saplamasının bağlantısını yapan M4 somun; 3: Üst bağlantı saplaması (M4); 4: Numune ile üst bağlantı saplamasının bağlantısını yapan numune üst somunu (M4); 5: Numune; 6: Numune ile alt bağlantı saplamasının bağlantısını yapan numune alt somunu (M6); 7: Alt bağlantı saplaması (M6); 8: Alt bağlantı parçası ile alt bağlantı saplamasının bağlantısını yapan alt somun (M6) ve 9: Alt bağlantı parçasıdır. Numunelerin çenelere bağlantısını gerçekleştiren 1 ve 9 numaralı alt ve üst bağlantı parçaları De Lorenzo S547-8899 Universal Tornada işlenmiştir. Numunelerin bağlantı parçalarına tutturulmasını sağlayan 3 ve 7 numaralı bağlantı saplamaları (sırasıyla M4 ve M6) hazır olarak temin edilmiş olup, testere tezgâhı ile uygun boyda kesilmiştir. Bu işlemin ardından torna tezgahında sırasıyla hassas boya getirilmiş, çapakları alınıp montaj kolaylığı sağlaması için pah kırılmıştır. Sistemdeki bağlantıları gerçekleştiren 2 şer adet M4 ve M6 somunlar hırdavatçıdan hazır olarak temin edilmiştir.

Numuneye ait katı model Solidworks yazılımı kullanılarak merkezinde 1 mm'lik boydan boya bir delik unsuru olacak şekilde çizilmiştir. Bu delik unsurunun sebebi numunenin M4 ve M6 vida unsurlarına ait delik ve kılavuz operasyonlarında eksen kaçıklarının engellemek üzere pilot delik vazifesi görmesidir. STL dosya formatındaki numune dosyasında Cura dilimleme yazılımı kullanılarak deney parametreleri oluşturulmuş ve her bir numuneye ait G-kodlar elde edilmiştir. Aşağıda deney parametreleri dışında sabit olarak alınan baskı parametreleri verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Sabit olarak alınan yazdırma parametreleri (Constant printing parameters)

Yazdırma parametresi	Birim	Değer
Filament çapı	mm	1.75
Nozul çapı	mm	0.4
Katman kalınlığı	mm	0.2
Boşta çalışma hızı	mm/s	100
Fan hızı	%	100

Numuneler, Creality-Ender 3 Pro 3B yazıcıda (Şekil 3) 1.75 mm çapında ve 1.24 g/cm³ yoğunluğunda Microzey marka PLA filament kullanılarak oluşturulmuştur.



Baskı Alanı: 22x22x25 cm
 Yazıcı Boyutları: 44x41x46.5 cm
 Maksimum Hareket Hızı: 180mm/s
 Filament: 1.75 PLA,TPU,ABS
 Giriş Voltajı: AC 110-220V 50-60Hz
 Çıkış: DC24V 15A 360W
 Nozzle: 0.4mm
 Hassasiyet: ±0.1mm
 Dosya Biçimi: STL,OBJ,G-CODE
 Çalışma Modu: Bilgisayar bağlantısı ya da SD Kart
 Max Nozzle Sıcaklığı: 255 Derece
 Max Tabla Sıcaklığı: 110 Derece

Şekil 3. Numunelerin basıldığı yazıcı ve buna ait özellikler (The 3D printer on which the samples are printed and its properties)

Deney tasarımı esas alınarak farklı baskı parametrelerinde basılan numuneler, universal torna tezgâhı aynasına bağlanarak sırasıyla $\phi 3.3$ mm matkapla delinmiş ve sonrasında M4 kılavuzla üst kısımdaki vida tutma kuvvetinin ölçüleceği vida unsuru oluşturulmuştur. Sonrasında parça diğer tarafından torna aynasına bağlanıp alt kısımdaki vida unsurunu oluşturmak üzere 5 mm'lik matkapla delinip M6 kılavuz çekilmiştir. Numunelerin bağlantı aparatları, saplamalar ve somunlarla montajı sonrasında ölçüm aşamasına gelinmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Ölçüm öncesi numunenin hazırlanması (Preparation of the sample before measurement)

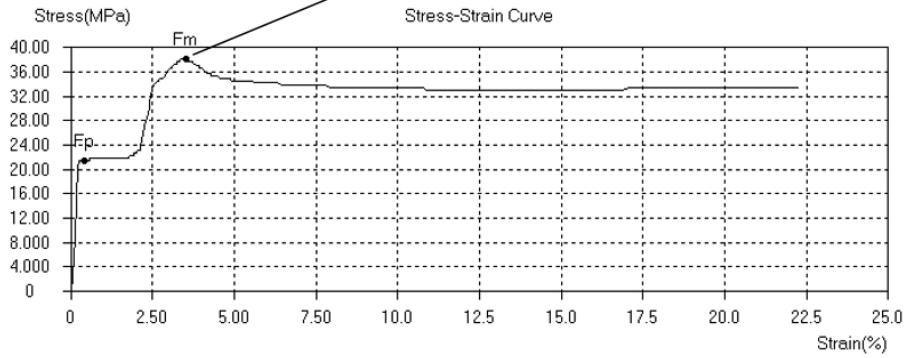
Numunelere ait vida tutma kuvveti ölçümleri 100 kN kapasiteli Hardway WDW100 serisi çift kolon çekme-basma test cihazında ASTM D638-14 Tip4'e uygun olarak 5 mm/dk'lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Numunelere ait vida tutma kuvvetlerinin ölçülmesi (Measuring the screw pull out forces of the samples)

Çekme testleri sonucunda cihazdan alınan maksimum kuvvet değeri vida tutma kuvveti (F_m) olarak alınıp, istatistiki hesaplamalarda kullanılmıştır. Aşağıda 20 mm/s'lik yazdırma hızı, 200 °C'lik yazdırma sıcaklığı, % 60 doluluk oranında 40 °C'lik tabla sıcaklığı ve ve Grid dolgu deseni şartlarında gerçekleştirilen 1 no'lu deneye ait sonuçlar verilmiştir (Şekil 6).

Coil No/Packet No		Type	Circle
Size(mm)	4	So(mm ²)	12.57
Lo(mm)	75	Lu(mm)	
A(%)	/	Su(mm ²)	/
Z(%)	/	Fm(kN)	0.480
Rm(MPa)	38	FeH(kN)	/
ReH(MPa)	/	FeL(kN)	/
ReL(MPa)	/	Fp(kN)	0.270
Rp(MPa)	21	E(GPa)	11

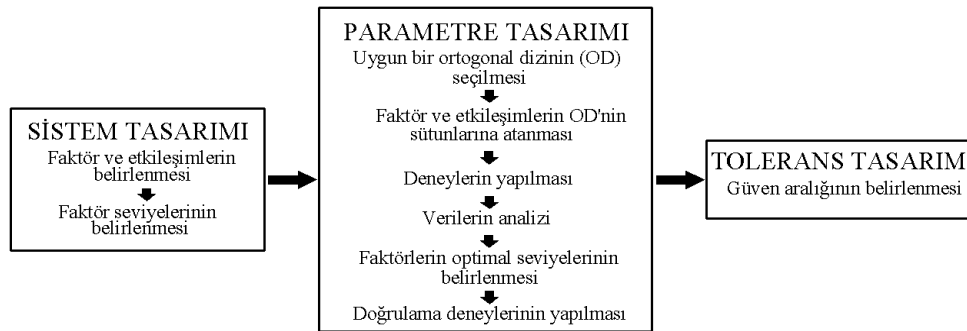


Şekil 6. Vida tutma kuvveti değerinin belirlenmesi (Determination of screw pull out force value)

Şekil 6'da görüldüğü gibi, vida tutma kuvveti çekme testindeki maksimum kuvvet olan 480 N olarak alınmıştır.

3. Deneysel Tasarım ve İstatistiksel Değerlendirme (Experiment Design and Statistical Evaluation)

Tüm istatistiksel çalışmalar, Taguchi yöntemi ile % 95 güven seviyesinde (0.05 anlamlılık oranında) Minitab 18 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Karmaşık hesaplamalar içermemesi, minimum deneyle yapılabilmesi ve bağımsız değişkenlerin en iyi seviyelerinin kolaylıkla elde edilmesi sebebiyle yöntem endüstriyel ve akademik araştırmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Yöntem, sistem, parametre ve tolerans tasarımı gibi ana bölümlerinden oluşmaktadır (Şekil 7) [24-27].



Şekil 7. Taguchi metodunun uygulama adımları (Application steps of the Taguchi method) [24-27]

Sistem tasarımı, bağımlı değişkeni etkileyen işlem parametrelerinin ve bu parametrelere ait seviyelerin tespit edildiği bölümdür. Parametre tasarımı, Taguchi yönteminin en kapsamlı ve kritik bölümüdür. Bu kısımda, işlem parametrelerine ilişkin en iyi seviyeler elde edilmekte; bu seviyelerdeki bağımlı değişken tahmin edilmekte ve bu seviyelerdeki doğrulama deneyleri yapılmaktadır. Tolerans tasarımı kısmında, belirli güven mertebesinde, tahmin edilen bağımlı değişkenin alt ve üst limitleri hesaplanmaktadır. Nihayetinde, doğrulama testlerine ait sonuç, bu aralığın içerisindeyse, yöntemin optimizasyonu yeterli doğrulukta ortaya koyduğu kabul edilmektedir [24-27].

Sunulan çalışmada, eriyik yığılma şekillendirme ile elde edilen PLA numunelerinin üretilmesindeki, önemli işlem parametrelerinin (yazdırma hızı, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı ve dolgu deseni) ve bunlara ait ikili etkileşimlerin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri Taguchi yöntemi kullanılarak istatistiksel olarak tartışılmıştır. Tablo 2'de yapılan pilot deneyler sonucunda elde edilen faktörler ve bunlara ait özellikler

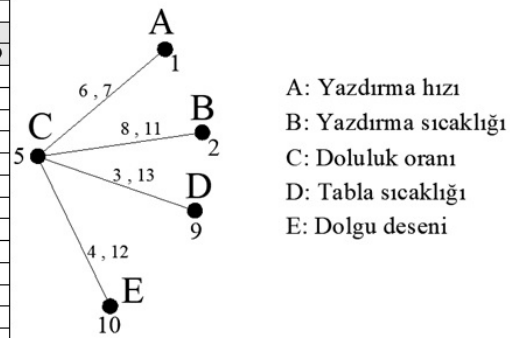
verilmiştir.

Tablo 2. Faktörler ve bunlara ait özellikler (Factors used and their properties)

Faktörler	Birimler	Seviyeler		
		1	2	3
Yazdırma hızı (A)	mm/s	20	50	80
Yazdırma sıcaklığı (B)	°C	200	215	230
Doluluk oranı (C)	%	60	80	100
Tabla sıcaklığı (D)	°C	40	60	80
Dolgu deseni (E)	-	Grid	Line	Gyroid

Araştırmadaki test miktarını ve hassasiyetini direkt olarak etkileyen OD 'nin tespiti, işlem parametrelerinin ve bunlara ait etkileşimlerin toplam serbestlik derecesini esas alarak belirlenmektedir. Seçilecek OD 'ye ait serbestlik derecesi deney sisteminin serbestlik derecesinden büyük ya da eşit olmalıdır [24-27]. Sistemin serbestlik derecesi, faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplanmasıyla elde edilmektedir [24-27]. İlgili işlem parametresine ait serbestlik derecesi, o faktöre ait seviye sayısından 1 çıkartılarak tespit edilmektedir. Böylece, deney sistemimizde beş işlem parametresi kullanıldığından, faktörlere ait serbestlik derecesi $5 \times 2 = 10$ dur. Etkileşimlerde ise, etkileşimi oluşturan parametrelere ait serbestlik dereceleri çarpılarak belirlenmektedir. Sistemde 2 adet etkileşim düşünüldüğünden, bunlara ait serbestlik derecesi $2 \times 4 = 8$ dir. Böylece, sistemin serbestlik derecesi $10 + 8 = 18$ olarak hesaplanmaktadır. Deneylerde 13 sütun ve 27 satırdan oluşan 26 serbestlik dereceli L27 ortogonal dizi seçilmiştir (Şekil 8). Bu matris test planını oluşturmakta olup, dizideki 27 satır parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri göstermektedir. Dizinin sütunlarına faktör ve bunlara ait etkileşimler atanmaktadır. Bu işlem için en yaygın metot lineer grafik yöntemidir. Şekil 8'deki lineer grafikte görüldüğü gibi matristeki birinci sütun yazdırma hızına (A), ikinci sütun yazdırma sıcaklığına (B), beşinci sütun doluluk oranına (C), dokuzuncu sütun tabla sıcaklığına (D), onuncu sütun dolgu deseni ve geri kalanlarda ikili etkileşimlere atanmıştır.

Deney no	Sütun no												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	A	B	CxD	CxE	C	AxC	AxC	BxC	D	E	BxC	CxE	CxD
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2



- A: Yazdırma hızı
B: Yazdırma sıcaklığı
C: Doluluk oranı
D: Tabla sıcaklığı
E: Dolgu deseni

Şekil 8. Faktör ve etkileşimlerin lineer grafik yöntemiyle sütunlara aktarılması ve L27 OD (Assignment of the factors and interactions to columns with linear graph method and L27 OA)

3.1. Deneysel bulgular ve istatistiksel analiz (Experimental results and statistical analysis)

Tablo 3'te L27 ortogonal dizi esas alınarak yapılan deney planı ve vida tutma kuvveti (F_m, N) ölçüm sonuçları görülmektedir.

Tablo 3. Numunelere ait vida tutma kuvveti sonuçları (Screw holding force results of samples)

Test no.	Yazdırma hızı (A)	Yazdırma sıcaklığı (B)	Doluluk oranı (C)	Tabla sıcaklığı (D)	Dolgu deseni (E)	F_m
1	20	200	60	40	Grid	480
2	20	200	80	60	Line	525
3	20	200	100	80	Gyroid	800
4	20	215	60	60	Line	475
5	20	215	80	80	Gyroid	520
6	20	215	100	40	Grid	995
7	20	230	60	80	Gyroid	465
8	20	230	80	40	Grid	785
9	20	230	100	60	Line	2005
10	50	200	60	60	Gyroid	320
11	50	200	80	80	Grid	640
12	50	200	100	40	Line	945
13	50	215	60	80	Grid	525
14	50	215	80	40	Line	720
15	50	215	100	60	Gyroid	935
16	50	230	60	40	Line	550
17	50	230	80	60	Gyroid	785
18	50	230	100	80	Grid	2110
19	80	200	60	80	Line	435
20	80	200	80	40	Gyroid	505
21	80	200	100	60	Grid	890
22	80	215	60	40	Gyroid	425
23	80	215	80	60	Grid	900
24	80	215	100	80	Line	1160
25	80	230	60	60	Grid	625
26	80	230	80	80	Line	925
27	80	230	100	40	Gyroid	1310

3.1.1. Varyans analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Çalışmada yazdırma hızı (A), yazdırma sıcaklığı (B), doluluk oranı (C), tabla sıcaklığı (D), dolgu deseni (E) ve bunlara ait 2 adet ikili etkileşimlerin ($B \times C$ ve $B \times E$) vida tutma kuvveti üzerindeki etkilerini incelemek ve anlamlı parametreleri belirlemek için ANOVA gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara ait ANOVA değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre; yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimleri anlamlıdır. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en dominant etkiye sahip olduğu ve bunu anlamlılık oranıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) işlem parametreleri izlemektedir. Polimer ürünlerin imalat parametrelerinin, çekme dayanımlarına olan etkilerinin incelendiği güncel literatür çalışmaları incelendiğinde de, doluluk oranının en önemli parametrelerden biri olduğu vurgulanmıştır [28]. Hikmat vd. [29] EYM ile PLA malzemeden ürettikleri numunelerin yazdırma parametrelerinin çekme dayanımlarına etkilerini Taguchi metodu ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, imalat yönünün en etkili parametre olduğunu bunu anlamlılık sırasına göre, nozul çapı, doluluk oranı, dış çerçeve sayısı, nozul sıcaklığı, üretim açısının ve yazdırma hızının izlediğini elde etmişlerdir. Çalışmamız ile paralel olarak doluluk oranının çekme mukavemeti üzerinde anlamlı ve yazdırma hızının da anlamlı olmadığını gözlemlemişlerdir.

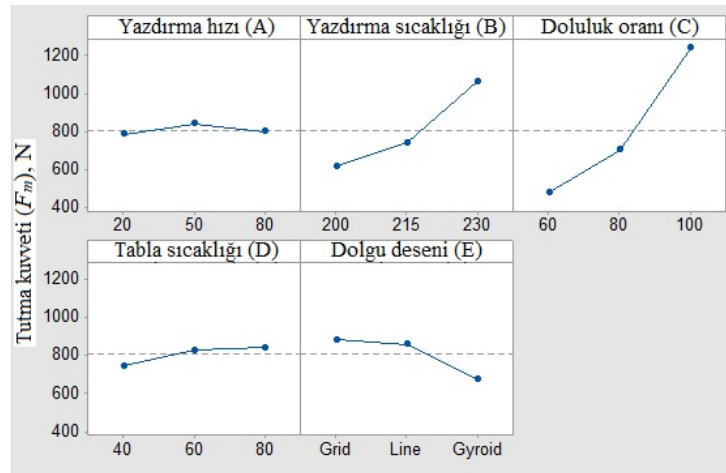
Tablo 4. Tutma kuvveti sonuçları için ANOVA (ANOVA for pull out force results)

Kaynak	DF	SS	V	F	$F_{0,05}$	SS'	PCR
Yazdırma hızı (A)	(2)	13780	-		4.46	-	-
Yazdırma sıcaklığı (B)	2	957135	478568	25.01	4.46	918869.88	18.62
Doluluk oranı (C)	2	2756169	1378084	72.03	4.46	2717903.88	55.08
Tabla sıcaklığı (D)	(2)	48802	-		4.46	-	-
Dolgu deseni (E)	2	237146	118573	6.20	4.46	198880.88	4.03
BxC	4	678115	169529	8.86	3.84	601584.76	12.19
CxE	(4)	66920	-		3.84	-	-
Hata	16	306121	19132.56		-	497445.6	10.08
Toplam	26	4934685			-	4934685	100

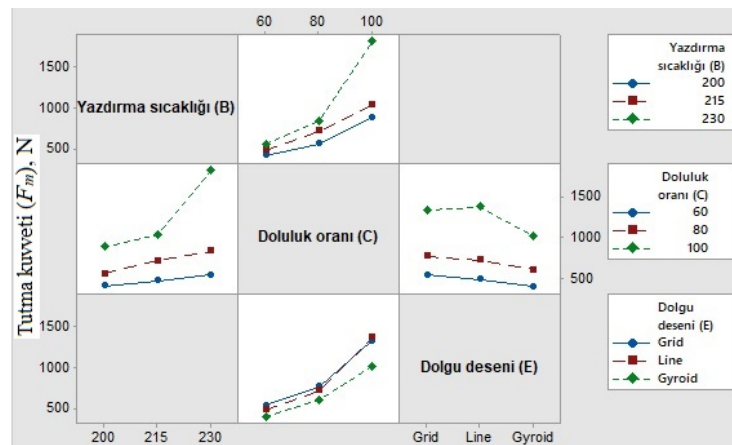
DF: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, V: Varyans, SS': Saf kareler toplamı ve PCR: Yüzde katkı oranı

3.1.2. Optimum tutma kuvvetinin belirlenmesi ve tartışma (Determination of the optimum pull out force and discussion)

Faktörlerin optimum tutma kuvvetini veren seviyeleri ANOVA, ana/etkileşim grafikleri esas alınarak tespit edilmiştir. Ana etkiler grafiği (Şekil 9) incelendiğinde, anlamlı parametrelerden tutma kuvvetinin yazdırma sıcaklığı ve doluluk oranıyla doğru orantılı olarak değiştiği; yine en yüksek tutma kuvvetinin “Grid” dolgu deseninde elde edildiği bunu “line” ve “gyroid” desenlerinin izlediği açıkça görülmektedir. Buna göre 230 °C'lik yazdırma sıcaklığında, % 100 doluluk oranında ve Grid doluluk deseninde optimum tutma kuvveti elde edilecektir. Benzer şekilde etkileşim grafiğinde (Şekil 10) yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı etkileşiminde, 230 °C'lik yazdırma sıcaklığında ve % 100'lük doluluk oranında dramatik bir kuvvet artışı elde edilmiştir. Anlamlı olmayan faktörlere ait grafiklere bakıldığında, 50 mm/dk'lık yazdırma hızında ve 80 °C'lik tabla sıcaklığında daha yüksek tutma kuvvetleri gözlemlenmiştir.



Şekil 9. İşlem parametrelerine ait ana etkiler grafiği (Main effects graph of process parameters)



Şekil 10. Faktörlere ait ikili etkileşimler grafiği (two-way interactions graph of factors)

Bu verilere ışığında, optimum kuvvet yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= \% 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) elde edilmiştir. Taguchi optimum tutma kuvvetini aşağıdaki eşitlikle tahmin etmektedir.

$$P_t = M_{B_3C_3} + M_{E_1} - M_O \quad (1)$$

$M_{B_3C_3}$ Yazdırma sıcaklığı ve doluluk oranının 3. seviyesinde gerçekleşen deneylere ait ortalama (1808.33 N), M_{E_1} Dolgu deseninin 1. seviyesinde gerçekleşen deneylere ait ortalama (883.3 N) ve M_O da tüm deney sonuçlarına ait ortalamayı (805.74 N) ifade etmektedir Buna göre optimum tutma kuvveti 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir.

Bu işlemi takiben sistemin optimizasyonu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiğinin test edilmesi gerekmektedir. Bunun için ilk adım güven aralığının (CI) belirlenmesidir ve aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır [27].

$$CI = \left(F_{0.05}(1, DF_e) \cdot V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \quad (2)$$

Eşitlikteki $F_{0.05}(1, DF_e)$, 0.05 anlamlılık düzeyinde 1'e ve hatanın serbestlik derecesi (16) dikkate alınarak ilgili tablolardan 4.49 olarak alınmıştır. V_e hatanın varyans değerini ifade etmektedir ve 19132.56 olarak elde edilmiştir. R en iyi faktör değerlerinde yapılan doğrulama test sayısını temsil etmektedir ve üç adet gerçekleştirilmiştir. Son olarak n_{eff} , etkin tekrarlamaya sayısıdır ve Eş. 3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$n_{eff} = N / (1 + V_t) \quad (3)$$

Burada, N (27) toplam test sayısını, V_t (6) de, ortalamanın tahmin edildiği faktör ve etkileşimlere ait toplam serbestlik derecesini belirtmektedir. Buna göre, n_{eff} 3.86 olarak belirlenmiştir. Böylece, $CI = \pm 225.59$ olarak elde edilmiştir. Yapılan 3 adet doğrulama testine ait sonuçların ortalamasının $1660.3 < C_m < 2111.48$ aralığında yer alması gerekmektedir. Buna göre, en iyi şartlarda ($A_2=50$ mm/dk, $B_3=230$ °C, $C_3=\% 100$, $D_3= 80$ °C ve $E_1=$ Grid) gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde 1993.33 N ortalama tutma kuvveti elde edilmiş olup, sistemin optimizasyonu başarı ile gerçekleştirilmiştir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Farklı yazdırma parametrelerinin eriyik yığıma modelleme yöntemiyle üretilen PLA numunelerdeki farklı yazdırma parametrelerinin vida tutma kuvveti üzerindeki etkileri Taguchi metodolojisi ile değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Varyans analizine göre, yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı, dolgu deseni ve yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı faktör ve etkileşimleri anlamlıdır. Ayrıca, doluluk oranının % 55.08'lik oranla tutma kuvveti üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve bunu sırasıyla yazdırma sıcaklığı (% 18.62), yazdırma sıcaklığı- doluluk oranı (% 12.19) ve dolgu deseni (% 4.03) faktör ve etkileşimleri izlemektedir.
- Ana etkiler grafiğine göre, vida tutma kuvvetinin yazdırma sıcaklığı, doluluk oranı ve tabla sıcaklığı ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenirken, "Grid" dolgu deseninde en yüksek tutma kuvveti elde edilmiş ve bunu "Lines" ve "Gyroid" seviyelerinin izlediği belirlenmiştir. Etkileşim grafiği dikkate alındığında, ana etkiler grafiğini doğrular nitelikte yazdırma sıcaklığı-doluluk oranı etkileşiminde 230 °C yazdırma sıcaklığında ve % 100 doluluk oranında çok anlamlı bir artış olduğu gözlemlenmiştir
- Optimum tutma kuvvetinin yazdırma hızının ikinci ($A_2= 50$ mm/s), yazdırma sıcaklığının üçüncü ($B_3= 230$ °C), doluluk oranının üçüncü ($C_3= \% 100$), tabla sıcaklığının üçüncü ($D_3= 80$ °C) ve dolgu deseninin birinci seviyesinde ($E_1=$ Grid) elde edilmiş ve Taguchi tarafından 1885.89 N olarak tahmin edilmiştir. Yine bu seviyelerde gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneylerinde ortalama 1993.33 N'luk tutma kuvveti elde edilmiş olup, belirlenen güven aralığında olduğu tespit edilmiştir. Böylece yapılan optimizasyonun yeterli doğrulukta olduğu söylenebilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012107398 başvuru no'lu proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] G. Kumar, G. Pavan and S.P. Regalla, "Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM)" *Trans Tech Publications- In Applied Mechanics and Materials*, vol 110, pp. 2245-2251, 2012. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245
- [2] B. Ergene, İ. Şekeroğlu, Ç. Bolat and B. Yalçın, "An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness" *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 15, no. 8, pp. 8169-8177, 2021. doi:10.46519/ij3dptdi.1069544
- [3] W.C. Smith and R. W. Dean, "Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material" *Polymer Testing*, vol. 32, no. 8, Pages 1306-1312, 2013. doi:10.1016/j.polymertesting.2013.07.014
- [4] C. Weller, R. Kleer and F. T. Piller, "Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited", *Int. J. Production Economics*, vol. 164, pp. 43-56, 2015. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020
- [5] N. Ercan ve D. E. Yunus, "Eriyik yığıma modelleme ile üretilen hücresel sandviç panellerin basma özelliklerinin incelenmesi" presented at the 4 th International Congress on 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry (3D-PTC2019), Antalya, 2019.
- [6] S. H. Yazdani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam and K. Hermenean, "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance", *Composite Structures*, vol. 200, pp. 886-909, 2018. doi:10.1016/j.compstruct.2018.04.002
- [7] B. Ergene and Ç. Bolat, "An experimental study on the role of manufacturing parameters on the dry sliding wear performance of additively manufactured PETG" *International Polymer Processing*, vol. 37, no. 3, pp. 255-270, 2022. doi:10.1515/ipp-2022-0015
- [8] B. Ergene and B. Yalçın, "Eriyik yığıma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi" *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 38, sayı 1, ss. 201-218, 2023. doi:10.17341/gazimmfd.945650
- [9] D. Chaidas, K. Kitsakis and S. Maropoulos, "The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process". 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference, Kallithea Chalkidiki, 2016.
- [10] M. Günay, R. Kaçar, H. Yılmaz, H. Demir ve S. Gündüz, "3D Baskı ile Üretilen PLA Esaslı Numunelerde Doluluk Oranı ve Tarama Açısının Mekanik Özelliklere Etkisi", 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 2018:33-39.
- [11] M. Aydın, F. Yıldırım ve E. Çantı "Farklı yazdırma parametrelerinde PLA filamentin işlem performansının incelenmesi", 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry, Antalya, 2018:295-307.
- [12] V. Tokdemir, S. Altun ve K. Kurtoğlu, "Ahşap filamentlerin ve baskı parametrelerinin çekme direncine etkisi" presented at the 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry , 2019.
- [13] S. Altun, V. Tokdemir ve S. Yılmaz, "Farklı ahşap filamentler ile yazdırılmış örneklerin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal kararlılığı" presented at the 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry , 2019.
- [14] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar ve R. Kaçar, "PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu" *Politeknik Dergisi*, cilt 23, sayı 1, ss. 73-79, 2020. doi:10.2339/politeknik.422795
- [15] M. Kam, H. Saruhan and A. İpekçi, "Investigation the effect of 3D printer system vibrations on surface roughness of the printed products", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 147-157, 2019. doi:10.29130/dubited.441221
- [16] B. Ergene, G. Atlıhan and A.M. Pinar, "Experimental and finite element analyses on the vibration behavior of 3D-printed PET-G tapered beams with fused filament fabrication" *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 634-651, 2023. doi:10.1108/MMMS-11-2022-0265
- [17] B. Ergene and Ç. Bolat, "An Experimental investigation on the effect of test speed on the tensile properties of the petg produced by additive manufacturing" *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 6, no. 2, pp. 250-260, 2022. doi:10.46519/ij3dptdi.1069544

- [18] A. Zeren and E. Maral. "Screw pullout behaviour in polyethylene" *Materials and Design*, vol. 28, no. 10, pp. 2698-2705, 2007. doi:10.1016/j.matdes.2006.10.007
- [19] E. Ünal, "The effect of different tread profiles on pullout strength of glass fiber reinforced polymer composite materials." *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 39, no. 2, pp. 550-556, 2018. doi:10.17776/cs.421618
- [20] P. Yu, A. Manalo, W. Ferdous, C. Salih, R. Abousnina, T. Heyer and P. Schubel, "Failure analysis and the effect of material properties on the screw pull-out behaviour of polymer composite sleeper materials" *Engineering Failure Analysis*, vol. 128, e105577, 2021. doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105577
- [21] A. J. Kubiak, K. Lindqvist-Jones, K. D. Dearn and D. E. Shepherd, "Comparison of the mechanical properties of two designs of polyaxial pedicle screw" *Engineering Failure Analysis*, vol. 95, pp. 96-106, 2019. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.08.023
- [22] M. Einafshar, A. Hashemi and A. Kiapour, "Evaluation of the efficacy of modal analysis in predicting the pullout strength of fixation bone screws" *JOR Spine*, vol. 5, no. 4, e1220, 2022. doi:10.1002/jsp.2.1220
- [23] M. Einafshar, A. Hashemi, and G. Herry van Lenthe, "Homogenized finite element models can accurately predict screw pull-out in continuum materials, but not in porous materials" *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 202, e105966, 2021. doi:10.1016/j.cmpb.2021.105966
- [24] A. M. Pinar, "Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminium alloy via Taguchi method," *The Arabian Journal for Science and Engineering B: Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 705-714, 2013. doi:10.1007/s13369-012-0372-5
- [25] A. M. Pinar and A. Güllü, "Optimization of numerical controlled hydraulic driven positioning system via Taguchi method" *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 25, no. 1, pp. 93-100, 2010.
- [26] A. M. Pinar and K. Firat, "Machinability evaluation of multi-directional turning tools" *Materials Testing*, vol. 62, no. 3, pp. 311-316, 2020. doi:10.3139/120.111487
- [27] A. M. Pinar ve K. Firat, "AISI 4140 çeliğin çok yönlü takımla tornalanmasında yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, cilt 19, sayı 4, ss. 491-498, 2016. doi:10.2339/2016.19.4 491-498
- [28] H. Radhwan, Z. Shayfull, A. E. H. Abdellah, A. R. Irfan and K. Kamarudin, "Optimization parameter effects on the strength of 3D-printing process using Taguchi method," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2129, no. 1, e020154, 2019. doi:10.1063/1.5118162
- [29] M. Hikmat, S. Rostam and Y. M. Ahmed, "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology," *Results in Engineering*, vol. 11, e100264, 2021. doi:10.1016/j.rineng.2021.100264

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Effect of Surface Topography on Soil Amplification

Ayhan Doğan^{a*}, Ünal Dikmen^b

Submitted: 22.03.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 07.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705074

ABSTRACT

Keywords: Soil amplification,
Surface topography, Earthquake,
Geophysics

^{a*} Hacettepe University, Başkent OSB
Vocational Higher School of Technical
Sciences, Department of Computer
Technologies,
06909 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9872-8889
e-mail: aydogan@hacettepe.edu.tr

^b Ankara University
Faculty of Engineering, Geophysical
Engineering,
06830-Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7603-4296

*Corresponding author:
aydogan@hacettepe.edu.tr

Soil amplification is known as the increase in amplitudes of seismic waves as they pass through the soil layers. It depends on many factors such as seismic bedrock depth and slope, the thickness of its layers, physical and lithological properties, discontinuities, and topography. In this study, the effect of surface topography on local soil amplification was investigated. A software called SiteEffect3D has been developed to examine soil behavior with the three-dimensional finite element method. With the software, the effect of surface topography on local soil amplification was investigated using various three-dimensional models. These models were exposed to two synthetic acceleration records as well as the 17 August 1999 Izmit earthquake (Mw. 7.4) acceleration record. Peak ground acceleration values at the nodal points of the surface topography elements were obtained and plotted as a result of the dynamic analysis.

Dynamic analysis results show that peak ground acceleration values change significantly when surface topography is used. Peak ground acceleration values are high on hills with few flat areas, and the slope of the hill also affects the result. There are also remarkable changes in the Peak Ground Acceleration results on the hills located in the regions where the flat areas are wider. However, the effect of the slope is relatively less on the hills in the wide plains.

Yüzey Topoğrafyasının Zemin Büyütmesine Etkisi

ÖZ

Zemin büyütmesi, sismik dalgaların zemin tabakalarından geçerken genliklerindeki artış olarak bilinir. Zemin büyütmesi, sismik ana kaya derinliği ve eğimi, fiziksel ve litolojik özellikleri, yanal ve düşey süreksizlikler, tabakaların kalınlığı ve topoğrafyası gibi birçok etkene bağlıdır. Bu çalışmada, yüzey topoğrafyasının yerel zemin büyütmesine etkisi araştırılmıştır. Zemin tepkisinin 3- Boyutlu sonlu eleman yöntemiyle inceleyebilmek için SiteEffect3D isminde bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım ile yüzey topoğrafyasının yerel zemin büyütmesine etkisi çeşitli 3-Boyutlu modeller kullanılarak incelenmiştir. Bu modeller 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) ivme kaydı ve sentetik ivme kayıtlarına maruz bırakılmış, dinamik analiz sonucunda model topoğrafyası üzerindeki sonlu eleman düğümlerinde hesaplanan doruk ivme değeri sonuçlarından grafikler elde edilmiştir.

Dinamik analiz sonuçları, yüzey topoğrafyası kullanıldığında doruk ivme değerlerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Düz alanların az olduğu tepeliklerde doruk ivme değerleri yüksek çıkmakta, tepenin eğimi de sonucu etkilemektedir. Düz alanların daha geniş olduğu bölgelerde bulunan tepeliklerde de doruk ivme değeri sonuçlarında dikkate değer değişiklikler görülmüştür. Ancak, geniş düzlükler içerisinde bulunan tepelerde eğim değişiminin etkisi görece daha azdır.

Anahtar Kelimeler: Zemin
büyütmesi, Yüzey topoğrafyası,
Deprem, Jeofizik

1. Giriş (Introduction)

Sismik dalgalar yer içinde yayıldıkça, genliklerinde, frekans bileşenlerinde ve seyahat sürelerinde değişiklikler olur. Bu değişikliklerin çeşitli nedenleri olabilir [1, 2]. Bunlar; en üstteki zemin katmanıyla onun altında bulunan katmanlar ve anakayanın farklı yoğunlukta olması ve bu katmanların sismik hızları farklı etkilemesi nedeniyle oluşan empedans farklılıkları, anakayanın derinliği, zemin tabakalarının kalınlık farkları, süreksizlikler, zemin tabakalarına ait dinamik ve fiziki özellikler, ana kaya ve yeryüzeyi topografyası sayılabilir [3-8].

Topoğrafyanın kuvvetli yer hareketleri sırasında zemin yüzeyindeki etkisi birçok çalışmaya konu olmuştur. Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkileri incelenmiştir [2, 9-11]. Haşal (2009) yaptığı çalışmada topoğrafik özellikleri, hem zemin üstünde hem de zemin altında katmanların geometrik özellikleri şeklinde tanımlamaktadır. Yaptığı çalışmanın sonuçlarında, zemin tabakalarının yatay doğrultuda sınırlı genişliği olan ova ve vadi sınırlarında dalga hareketinde dönüşümlere ve yüzey dalgalarına yol açtığını, iki boyutlu rezonans durumları oluşabildiğini, yer hareketinin frekans içeriği ve genliğinin vadi kenarlarıyla ortasında farklılık oluşturduğunu, dik yamaçlarda ve tepelerde ani genlik artışları görülebileceğini belirtmiştir. Başka bir çalışmada, çevresi düz olan tepelik alanlarda SH dalgalarının tepe üstünde yüksek büyütme değerine ulaştığını, vadi olan bölgelerde ise tam tersi küçültme olacağını, büyütmenin ise yatay bileşenlerde çok daha fark edilebilir olduğunu ve bunların eğim, sismik dalgaların geliş açısı ve yönüyle de ilgili olabileceği belirtilmiştir [12]. Jibson (1987) bir yamacın zirvesinde ölçülen ortalama doruk ivme değerlerinin (PGA) tabandakinden 2.5 kat daha yüksek olduğunu söylemiştir. Bazı çalışmalar, alüvyal vadilerde deprem dalgasının etkilerinin 1-Boyutlu (1-B) analizlerle doğru bir şekilde tahmin edilemeyeceğini ortaya koymuştur [13-15]. Başka bir çalışma, P, SV ve SH dalgalarının alüvyal bir vadideki etkilerini incelemişler, spektral büyütmelerin 1-B analizlerle elde edilen sonuçlardan yaklaşık 4 kat daha fazla çıkabileceğini göstermiştir [16]. Bard ve Gariel (1986) sığ ve derin vadilerde 1-B ve 2- Boyutlu (2-B) analizler yaparak, transfer fonksiyonlarının vadi merkezinden kenarlara doğru önemli ölçüde değiştiğini, vadi kenarında ise tamamen farklılaştığını göstermiştir [17]. Bazı çalışmalarda, vadi derinliğinin baskın periyot üzerindeki etkisinin vadi genişliğinden daha çok olduğunu saptamış ve vadi kenarlarındaki eğim arttıkça vadi merkezindeki spektral büyütmenin arttığını belirtmişlerdir [18, 19]. Rassem vd. (1997) yerel zemin baskın periyodunun vadi merkezinde vadinin diğer yerlerine göre daha fazla olduğunu belirtmiştir [18]. Poursartip vd. (2017) çalışmalarında 2-B topoğrafik düzensizliklerin yerel zemin etkisini araştırmış, topoğrafyanın zemin büyütmesine önemli katkıları olduğunu belirterek modelleme yapılırken fiziksel arazinin mümkün olduğu kadar aslına sadık bir geometrik temsilini korumanın önemine vurgu yapmıştır [20]. Derghoum ve Derghoum (2023) Cezayir'in Konstantin şehrinin Ciloc bölgesinde yaptıkları çalışmada yüzey jeolojisi ve topoğrafya düzensizliklerinin zemin büyütmesine etkilerini araştırmışlardır. Maksimum saha büyütmelerinin inceledikleri tepenin arkasında meydana geldiğini ve alüvyal homojen oluşumların diğer durumlara göre yüksek spektral büyütme neden olduğunu belirtmişlerdir [21]. Zhang vd. (2018) Çin, Sichuan, Zigong şehrinde yaptıkları çalışmada topoğrafyanın ve yumuşak malzemelerin yerel varlığının hem arazi gözlemlerinde hem de sayısal modelde yer hareketini önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir [22]. Baron vd. (2022) İtalya'da yaptıkları çalışma sonucunda, topoğrafik eğim ile amplifikasyon arasında ilişki olduğunu ortaya koymuştur [23].

Bu çalışmada, farklı yüzey topoğrafyalarını temsil edecek şekilde oluşturulan sentetik modeller kullanılarak 3-Boyutlu (3-B) dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu dinamik analizlerin sonuçlarında sonlu eleman model topoğrafyasına ait düğüm noktalarında hesaplanan PGA değerleri kullanarak haritalandırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and method)

Çalışma kapsamında çeşitli sentetik 3-B sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Bunlar, düz eğimsiz zemin (%0 eğim), %30, %45 ve %60 eğimli topoğrafyaya sahip modeller oluşturularak topoğrafyanın etkisi araştırılmıştır. Tüm modellerle dinamik analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen PGA değerleri kullanılarak oluşturulan PGA haritaları karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu modeller çeşitli ivmelere maruz bırakılarak yeniden dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonra X ve Y yönünde daha geniş 3-B modeller oluşturularak daha büyük düzlüklerde bulunan farklı eğimlere sahip tepelerin etkisi araştırılmıştır. Modellerin hazırlanması ve dinamik analizlerin gerçekleştirilmesi SiteEffect3D programı kullanılarak yapılmıştır [2]. MATLAB tabanlı geliştirilen SiteEffect3D yazılımı 3-B ağ oluşturulmasında düzgün dörtyüzlü (tetrahedron) eleman kullanır.

3-B ağın oluşturulmasında ve rafine edilmesinde MATLAB programlama ortamı PDE araç komutlarından yararlanır.

Uygulamalarda modellerin çeşitli giriş ivmelerine maruz kaldıklarındaki sonuçlarda ortaya çıkan değişim de araştırılmıştır. Bunun için kullanılan giriş ivmeleri farklı olduğundan her bir test işlemine ait PGA renk ölçekleri kendi içinde aynı, fakat diğer testlerde farklı kullanılmıştır. Tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmış olup sadece üst yüzey serbest bırakılmıştır. Makaledeki grafik sayısının çok artmaması için birbirine çok benzer sonuçları bulunan yatay bileşenlerden sadece bir tanesi (X bileşeni) ile düşey bileşen (Z bileşeni) kullanılmıştır. Yapılan dinamik analizlerde sentetik ivme kayıtları ve 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) ivme kaydı kullanılmıştır. Kullanılan yapay modeller tekdüze ve izotrop olup zemin parametreleri modellere göre farklılık göstermektedir.

Tüm modellerde ağıdaki sonlu elemanların en boy oranları (aspect ratio) literatüre uygun olarak oluşturulmuştur. Modellerdeki sonlu elemanların en boy oranları, Model 1’de eğimin olmadığı ve eğimin %30 olduğu ilk iki modelde 1-2 arasında, eğimin %45 olduğu modelde 1-3 arasında, eğimin %60 olduğu modelde ise 1-6 arasında değişmektedir. Model 2’de tüm eğimlerdeki modellerde en boy oranları 1-2 arasında değişmektedir. Literatürde sonlu eleman modellerinde kabul edilen ideal en boy oranları 1-3 veya 1-5 aralığındadır. Bazı araştırmacılar en boy oranının 10 değerine kadar dikkatli olarak kullanılabilirliğini ancak 10 değerinden sonra kullanılmaması gerektiğini tavsiye etmektedirler [24, 25]. Başka görüşteki araştırmacılar ise en boy oranının sonuçlar üzerindeki etkisinin zannedildiği gibi büyük olmadığını ifade etmektedirler [26-28]. Çalışmada kullanılan sonlu elemanların en boy oranları literatürde belirtilen şartlara uygundur. Buna ek olarak sonlu eleman boyutlarının uygunluğu, deprem ivme kaydının frekans içeriği açısından örnekleme teoremi de dikkate alınarak kontrol edilmiştir.

Çalışmada yapılan dinamik analizlerde Neumann ve Dirichlet sınır koşulları kullanılmıştır. Neumann sınır şartında eleman sınırlarında yer değiştirmelerin türevleri, Dirichlet sınır şartında ise eleman sınırlarında yer değiştirmeler ön tanımlıdır. Model sınırlarından yansımayı azaltmak için, yüzey topografyasını temsil eden elemanlar hariç, model sınır elemanları dışarı doğru uzatılmış ancak dinamik analiz sonuçları değerlendirilirken sadece şekillerde gösterilen model boyutları dikkate alınmıştır.

Yapılan dinamik analizlerde Rayleigh sönüm yaklaşımı kullanılmıştır [29]. Rayleigh sönüm yaklaşımı viskoz sönüm uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir sönüm yaklaşımıdır. Rayleigh sönümü Eşitlik 1’de verildiği şekliyle kütle ve sıklıkla orantılı bir sönüm uygular.

$$C_i = \alpha_i M_i + \beta_i K_i \quad (1)$$

Buradaki α ve β ilgilenilen frekans aralığı ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen sabitleri, i alt indisi ise hesaplamanın i . eleman için yapıldığını gösterir. M_i eleman model kütle dizeyi, K_i ise eleman sıklık dizeyidir. Ayrıca α ve β ile sönüm oranı arasında Eşitlik 2’deki gibi bir ilişki mevcuttur.

$$\xi_i = \frac{\alpha_i}{2w} + \beta_i \times w \quad (2)$$

Burada w frekans değeri, ξ sönüm oranıdır. w değeri K dizeyinin öz değerlerinin karekökü alınarak elde edilir. Rayleigh sönüm dizeyinin doğal frekanslara bağlı değişimi Şekil 1’de gösterilmiştir [30]. Dinamik analiz sürecinde her bir zaman yinelemesi (iterasyonda) sonunda sonlu elemanlarda gelişen deformasyon düzeylerine bağlı olarak eleman sönüm değerleri güncellenir. Zeminlerde frekansın sönüm üzerindeki katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Sönüm için, genel yaklaşım; ilgilenilen frekans bandında düşük sönüm değerlerinin ve bu frekans bandının dışında ise büyük sönüm değerlerinin uygulanması şeklindedir. İlgilenilen iki frekans değerinden küçük olanı, w_1 basitçe incelenen modelin temel kipinin (mode) sahip olduğu frekans değeri seçilir. İkinci frekans değeri Eşitlik 3 ile hesaplanır. Burada N değerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar (özellikle 1-B), yüksek kipteki titreşimlerin temel kip titreşiminin tek katı olacak şekilde gerçekleştiğini göstermiştir [29].

$$w_2 = N w_1 \quad (3)$$

Burada $N = W_{deprem}/w_1$ değerinden büyük en yakın tek sayı olacak şekilde seçilir. W_{deprem} frekansı analizde giriş olarak kullanılan deprem ivme kaydının temel titreşim frekansıdır. Modeldeki her bir sonlu eleman için

w_1 ve w_2 frekanslarının belirlenmesiyle α_i ve β_i değişkenleri Eşitlik (4a, 4b) ile hesaplanır.

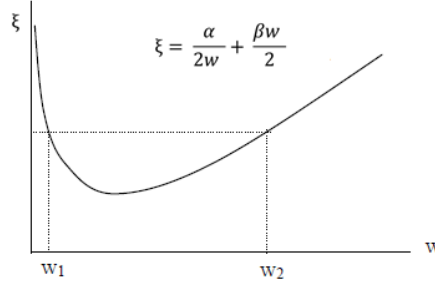
$$\alpha_i = 2\xi_i + \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2} \quad (4a)$$

$$\beta_i = 2\xi_i + \frac{1}{w_1 + w_2} \quad (4b)$$

Her bir elemanın sönüm oranını gösteren ξ_i değeri, model kütle, M ve sıklık, K dizeleri ile modelin w_1 temel titreşim frekansı yardımıyla Eşitlik 5'ten elde edilir.

$$K\varphi^1 = w_1^2 M\varphi^1 \quad (5)$$

Burada φ^1 modelin temel kip şeklini gösterir. Şekil 1'de görüleceği üzere, Rayleigh sönüm yaklaşımı sismik dalga üzerinde w_1 ve w_2 frekans aralığında düşük, bu frekansların dışında yüksek sönüm uygulamaktadır.



Şekil 1. Sönüm oranının (ξ) doğal titreşim frekansı ile değişimi

3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

Bu çalışmada kullanılan 3-B sonlu eleman modelleri 2 ayrı grup halinde oluşturulmuştur. Her bir model grubu içerisinde %0, %30, %45 ve %60 olmak üzere 4 farklı yüzey eğimiiçermektedir. Modelleri birbirleriyle kıyaslayabilmek için zemin parametreleri tüm modellerde aynı alınmıştır.

3.1. Model 1 (Model 1)

İlk grup modellere ait geometrik özellikler, X ve Y yönünde 180m, Z yönünde 100m olacak şekilde tekdüze yapıda hazırlanmıştır. Modellere ait zemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Model 1'e ait zemin parametreleri (Soil parameters of Model 1)

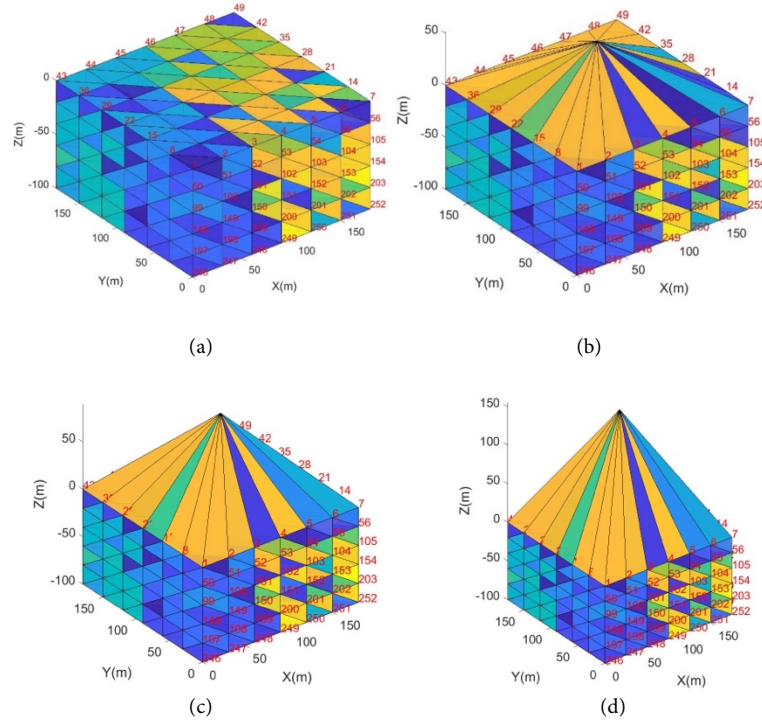
Vp Hızı (m/s)	Vs Hızı (m/s)	Yoğunluk (g/cm ³)
770	240	1.9

Model 1 grubundaki sentetik 3-B sonlu eleman modelleri Şekil 2'de verilmiştir.

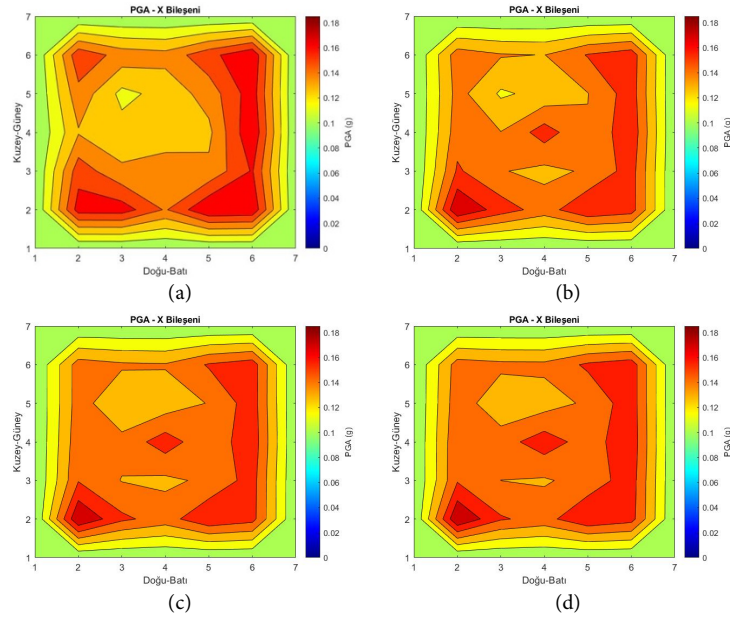
3.1.1. Model 1 - Test 1 (Model 1 - Test 1)

Test 1 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.1g olarak verilmiştir. Şekil 2'de verilen farklı eğimlere sahip Model 1 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 3-4'de verilmiştir.

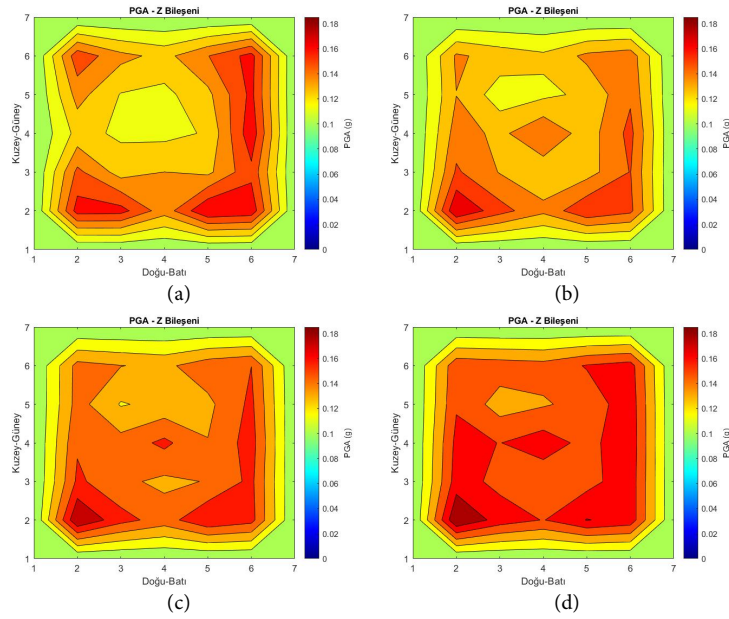
Model 1'in kullanıldığı Test 1'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz model ile %30 eğimli model sonuçlarının birbirine kısmen daha yakın olduğu, diğer eğimlere sahip modellerle farkın daha fazla olduğu ve eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında ise eğimsiz model ile diğer eğimlere sahip model sonuçlarının farklı olduğu ve X bileşeninde olduğu gibi eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2. Farklı eğime sahip yüzey topoğrafyalı modeller, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(Models with different sloping surface topographies, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



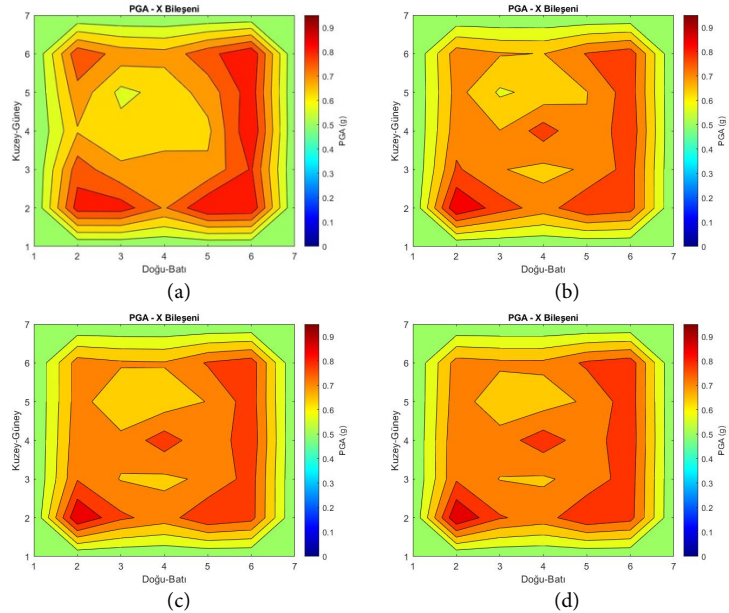
Şekil 3. Test1'den elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test1 for X-component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



Şekil 4. Test1'den elde edilen Z -bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test1 for Z-component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

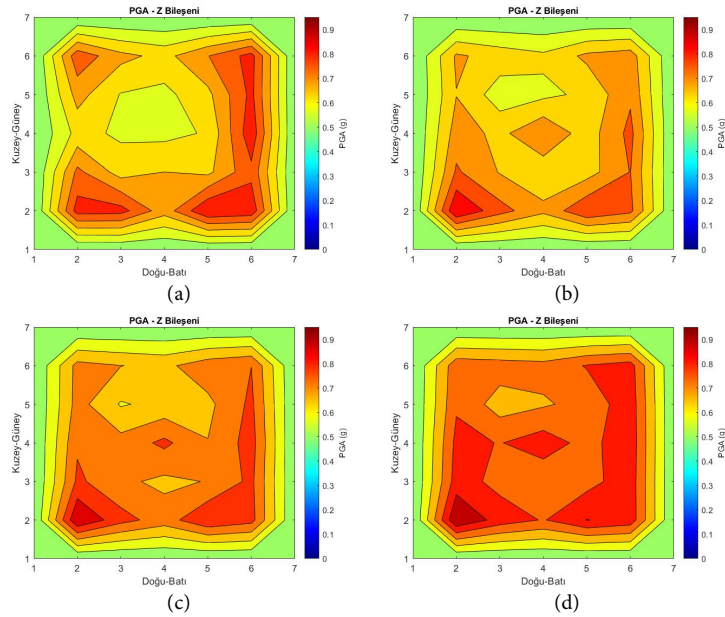
3.1.2. Model 1 - Test 2 (Model 1 - Test 2)

Test 2 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.5g olarak verilmiştir. Model 1 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 5-6'da verilmiştir



Şekil 5. Test2'den elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test2 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

Model 1'in kullanıldığı Test 2'ye ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında ise eğimsiz model ile diğer eğimlere sahip model sonuçlarının farklı olduğu ve X bileşeninde olduğu gibi eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında ortasına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, Z bileşeni sonuçlarında %60 eğime sahip modelin PGA değerleri hem kenarlarda hem de ortada yüksektir. Aynı zamanda özellikle Z bileşeni sonuçlarında eğimin artışıyla PGA değerlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 6. Test2'den elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test2 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

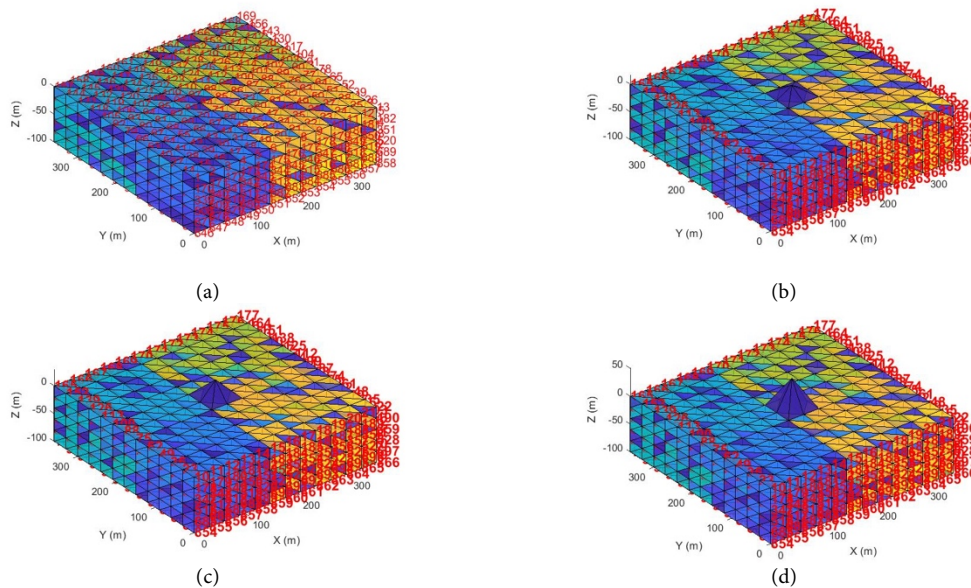
3.2. Model 2 (Model 2)

Model 2'de oluşturulan modelin boyutları hem X hem de Y yönlerinde iki kat genişletilmiştir. Modelin X ve Y yönlerindeki uzunluğu, modeldeki düğüm noktaları arasındaki ortalama uzunluk değerinin on iki katıdır. Tüm yüzeylerde sınır koşulları uygulanmış, sadece üst yüzey serbest bırakılmıştır. Aynı düzlem üzerinde en yakın düğüm noktalarının arasındaki mesafe 30m'dir. İkinci grup modellere ait geometrik özellikler, X ve Y yönünde 360m, Z yönünde 100m olacak şekilde homojen yapıda hazırlanmıştır. Modellere ait zemin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Model 2'ye ait zemin parametreleri (Soil parameters of Model 2)

Vp Hızı (m/s)	Vs Hızı (m/s)	Yoğunluk (g/cm ³)
770	240	1.9

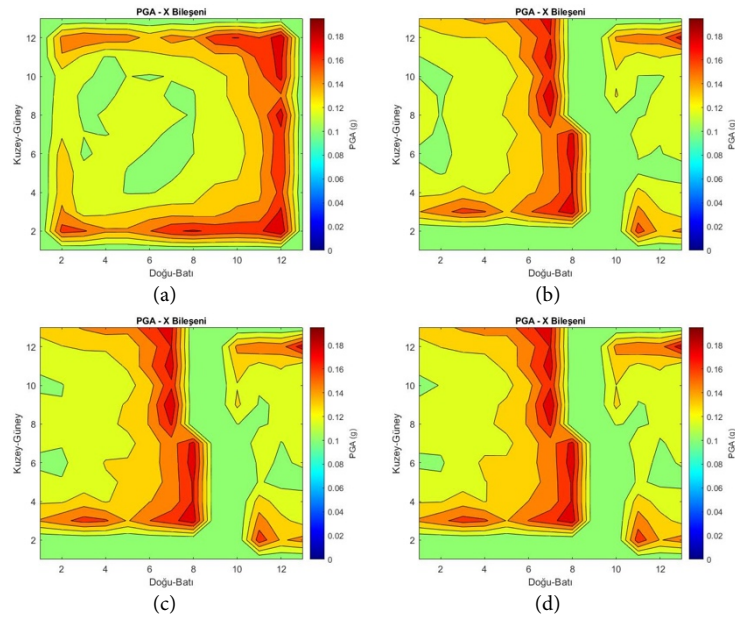
Model 2 grubundaki sentetik 3-B sonlu eleman modelleri Şekil 7'de verilmektedir.



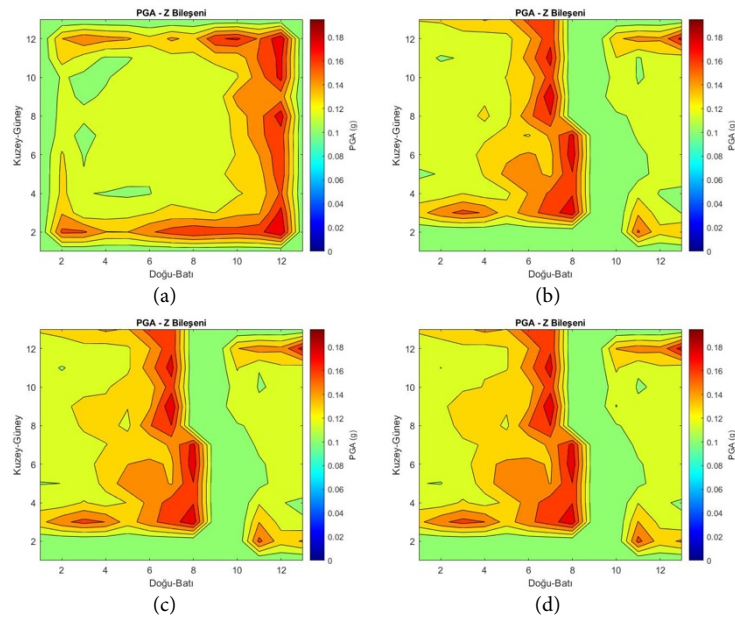
Şekil 7. Geniş alanlı farklı eğime sahip yüzey topoğrafyalı modeller, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(Large-area topographic models with different slopes, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

3.2.1. Model 2 - Test 3 (Model 2 - Test 3)

Test 3 için giriş ivmesi X, Y ve Z bileşenlerinde sabit 0.1g olarak verilmiştir. Model 2 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Model 2'nin kullanıldığı Test 3'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. Hem X bileşeni hem de Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, yine her iki bileşene ait sonuçlarda eğimli modellerde model ortasında yüksek PGA değerlerine sahip bir sırt ile onun bir yanında çok daha düşük PGA değerine sahip bir bölge ve diğer yanında ise sırt bölgesine göre görece daha düşük PGA değerine sahip alanlar ile kenarlara doğru daha düşük PGA değerine sahip alanlar göze çarpmaktadır.



Şekil 8. Test3'ten elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test3 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

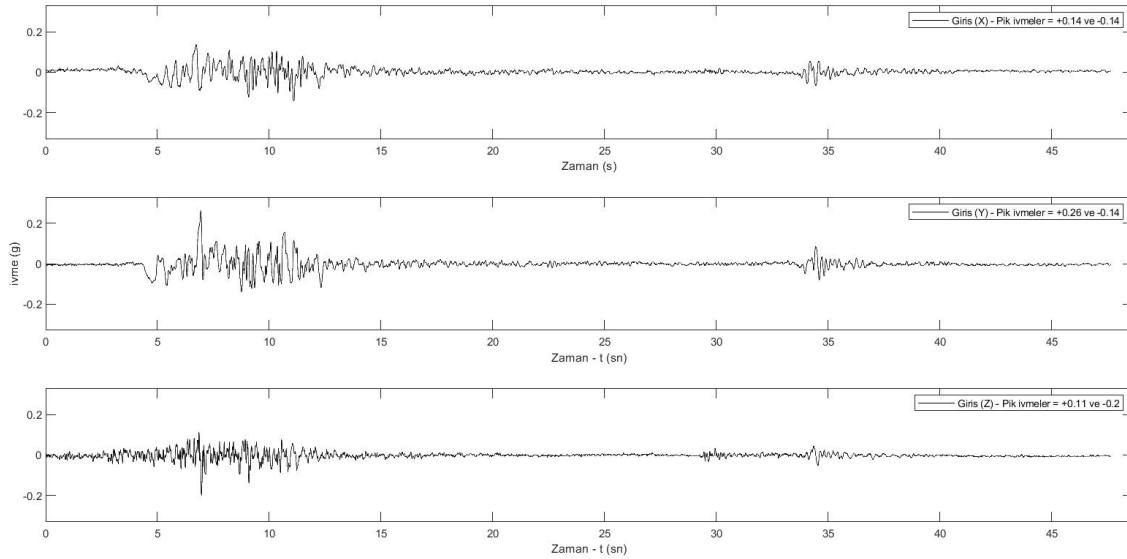


Şekil 9. Test3'ten elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test3 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

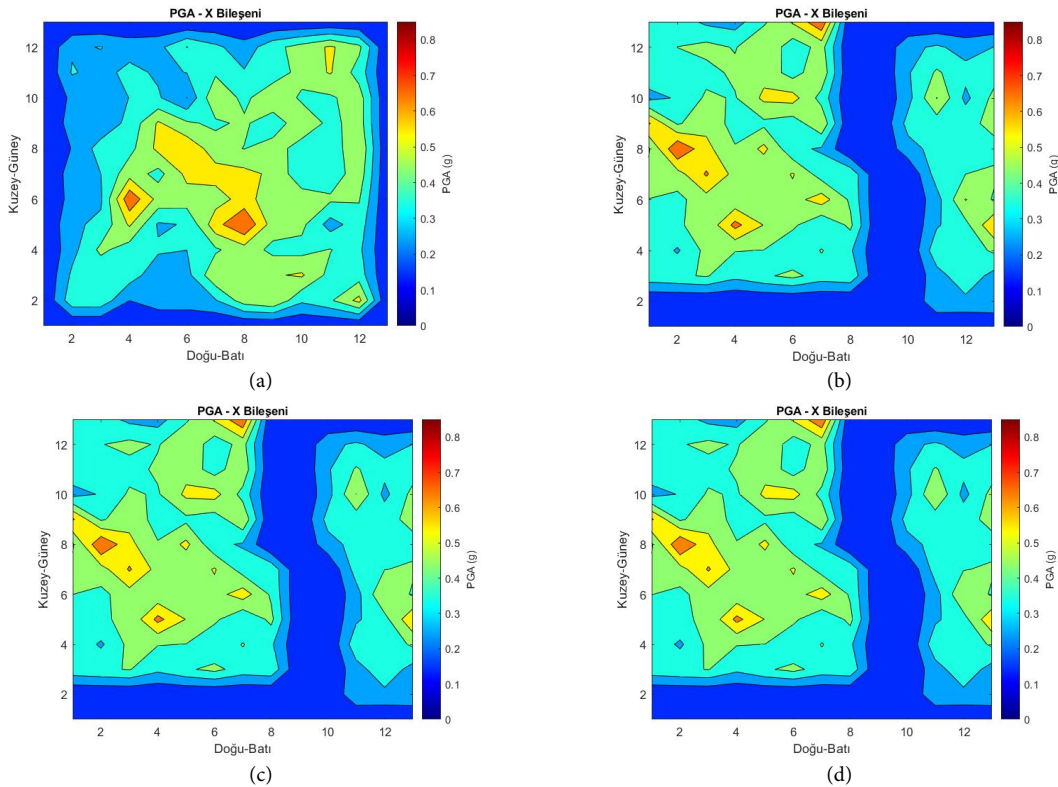
3.2.2. Model 2 - Test 4 (Model 2 - Test 4)

Test 4 için giriş ivmesi olarak Afet ve Acil Durum Başkanlığı (AFAD) tarafından işletilmekte olan 4106 kod numaralı Kocaeli Gebze istasyonuna ait 17 Ağustos 1999 ivme kaydı ölçeklenerek verilmiştir (Şekil 10). Model 2 kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen X ve Z bileşenlerine ait PGA grafikleri Şekil 11-12'de verilmiştir.

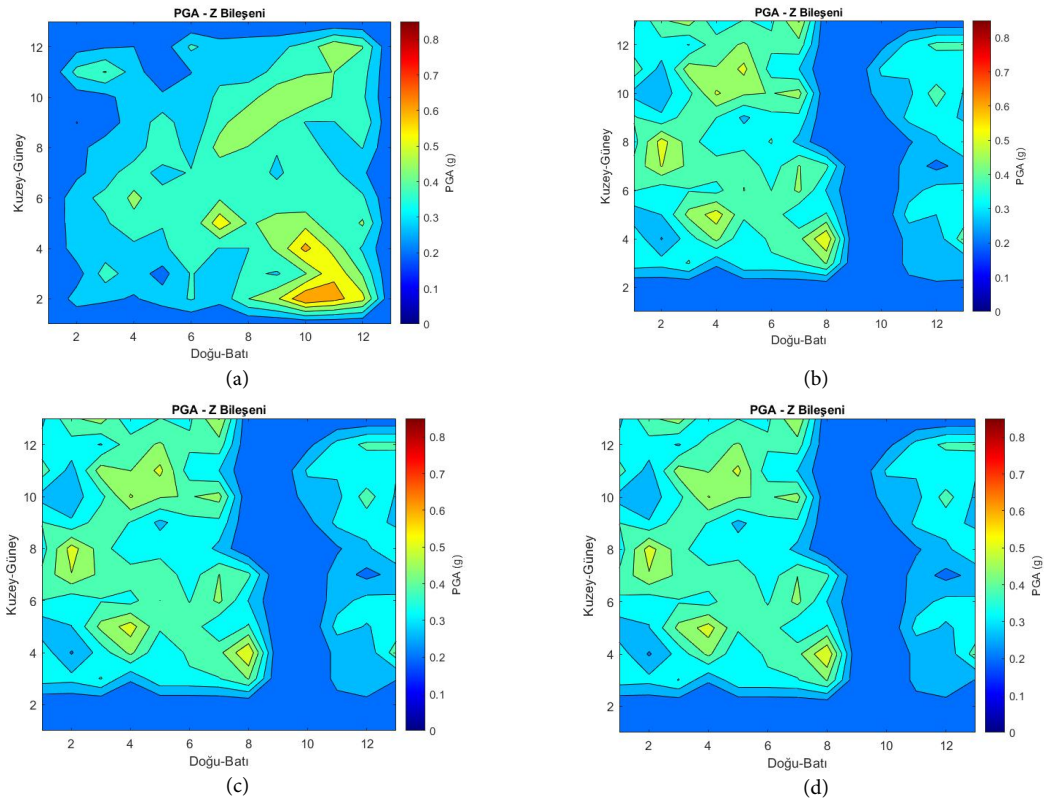
Giriş ivmesi - 17 Ağustos 1999 - 4106 Kocaeli Gebze İstasyonu - Ölçekli



Şekil 10. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw. 7.4) Gebze-Kocaeli istasyonu ivme kaydı - ölçekli (Acceleration record of 17, August 1999 İzmit Earthquake (Mw. 7.4) obtained at Gebze-Kocaeli station - scaled)



Şekil 11. Test4'ten elde edilen X bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60 (PGA graphics obtained as a result of Test4 for X component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)



Şekil 12. Test4'ten elde edilen Z bileşeni PGA grafikleri, a) Eğim yok, b) Eğim %30, c) Eğim %45 ve d) Eğim %60
(PGA graphics obtained as a result of Test4 for Z component, a) Flat surface, b) Slope 30%, c) Slope 45% and d) Slope 60%)

Model 2'nin kullanıldığı Test 4'e ait sonuçlar incelendiğinde eğimsiz model (%0 eğim) ile diğer modellerin PGA sonuçlarının çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. X bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin ortalarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Z bileşeni sonuçlarına bakıldığında eğimsiz modelde PGA değerlerinin özellikle modelin kenarlarında görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, her iki bileşene ait sonuçlarda eğimli modellerde model ortasından bir kenara doğru görece daha yüksek PGA değerlerine sahip alanlar ile onun diğer yanında çok daha düşük PGA değerine sahip bölge göze çarpmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Dinamik analiz sonucunda, yüzey topoğrafyasının 3-B sonlu eleman modelinde doruk ivme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Sentetik modellerle yapılan çalışmalarda alanı görece daha dar olan düzlükler üzerinde bulunan tepelerde doruk ivme değerlerinde büyük farklılıklar olduğu ve tepenin eğimine bağlı olarak farklılaştığı görülmüştür. Görece daha geniş düzlüklerde tepelik alanlar olması durumunda yine doruk ivme değerlerinde dikkate değer değişimler olduğu, ancak eğime bağlı etkinin geniş düzlüğe sahip alanlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Gerçek deprem ivme kayıtlarıyla yapılan çalışma sonuçlarında farklılıklar olsa da topoğrafya eğiminin değişimiyle sonuçlardaki doruk ivme değerlerindeki değişim açıkça görülmektedir. Gerçek deprem ivme kaydı ile sentetik ivme kayıtları kullanılarak yapılan dinamik analiz sonuçlarındaki farklılığın, frekans içeriğinin farklılık göstermesi ve bunun farklı zemin özelliklerine etkisinin değişkenliğiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

Tüm sonuçlar, modelde yüzey topoğrafyasının dikkate alınmamasının dinamik analiz sonuçlarında değişime sebep olabilecek önemli bir faktör olduğunu açıkça göstermektedir. Özellikle tepe, vadi gibi belirgin topoğrafik farklılıkların bulunduğu ortamlarda yapılacak dinamik analiz çalışmalarının topoğrafyanın da modele mutlaka eklenerek 3-B olarak yapılmasının önemli olduğu ve sonuçlar üzerinde kayda değer değişikliklere sebep olabileceği görülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Tüm zemin türleri, ivme kayıtları ve her türlü zemin modelinin tek bir çalışmada değerlendirilmesi mümkün olmadığından, bu çalışma belirlenen zemin parametreleri, kullanılan örnek ivme kayıtları ve modellerle sınırlı tutulmuştur. Yapılan dinamik analizler bu parametrelerle gerçekleştirilmiş ve sonuçlar buna göre elde edilmiştir. İleride yapılması düşünülen çalışmalarda farklı zemin parametreleri ve farklı ivme kayıtları kullanılarak daha farklı topoğrafik zemin türlerinin incelenmesi konunun daha da genişletilmesini sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] K. Bashir, R. Debnath, and R. Saha, "Estimation of local site effects and seismic vulnerability using geotechnical dataset at flyover site Agartala India," *Acta Geophysica*, vol. 70, no. 3, pp. 1003-1036, 2022. doi:10.1007/s11600-022-00753-3
- [2] A. Doğan, "Yer tepkisinin üç boyutlu sonlu eleman yöntemiyle belirlenmesi," Doktora Tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2021.
- [3] H. Mittal, Kamal, A. Kumar, and S. K. Singh, "Estimation of site effects in Delhi using standard spectral ratio," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 50, pp. 53-61, 2013. doi:10.1016/j.soildyn.2013.03.004
- [4] E. Şafak, "Local site effects and dynamic soil behavior," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 453-458, 2001. doi:10.1016/S0267-7261(01)00021-5
- [5] M. K. Koçkar and H. Akgün, "Evaluation of the site effects of the Ankara basin, Turkey," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 83, pp. 120-134, 2012. doi:10.1016/j.jappgeo.2012.05.007.
- [6] A. Boominathan, G. R. Dodagoudar, A. Suganthi, and R. Uma Maheswari, "Seismic hazard assessment of Chennai city considering local site effects," *Journal of Earth System Science*, vol. 117, no. 2, pp. 853-863, 2008. doi:10.1007/s12040-008-0072-4
- [7] A. Kandilarov, K. Atakan, J. Havskov, and D. Gospodinov, "An investigation of the significance of local site effects in Plovdiv, Bulgaria," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 181-198, 2009/02/01 2009. doi:10.1007/s10518-008-9091-4
- [8] P. Moczo *et al.*, "Key structural parameters affecting earthquake ground motion in 2D and 3D sedimentary structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 2421-2450, 2018/06/01 2018. doi:10.1007/s10518-018-0345-5
- [9] P. Pelekis, A. Batilas, E. Pefani, V. Vlachakis, and G. Athanasopoulos, "Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6. 4 earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 100, pp. 538-554, 2017.
- [10] M. E. Haşal, "Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkisi," Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [11] B. Ruan, K. Zhao, S.-Y. Wang, G.-X. Chen, and H.-Y. Wang, "Numerical modeling of seismic site effects in a shallow estuarine bay (Suai Bay, Shantou, China)," *Engineering Geology*, vol. 260, p. 105233, 2019. doi:10.1016/j.enggeo.2019.105233
- [12] A. Beliceli, "Eskişehir yerleşim yeri zemininin büyütme etkisinin makaslama dalga hızına (Vs) bağlı olarak belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [13] R. Jibson, "Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability," US Geological Survey, California, 1987.
- [14] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The seismic response of sediment-filled valleys. part 1: The case of incident SH waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 70, pp. 1263-1286, 1980a.
- [15] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The seismic response of sediment-filled valleys. part 2: The case of incident P and SV waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 70, pp. 1921-1941, 1980b.
- [16] P. Y. Bard and M. Bouchon, "The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 75, pp. 519-541, 1985, doi:10.1785/BSSA0750020519
- [17] P. Y. Bard and J. C. Gariel, "The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 76, pp. 343-366, 1986.
- [18] M. Rassem, A. Ghobarah, and A. C. Heidebrecht, "Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 26, no. 4, pp. 477-493, 1997. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199704)26:4<477::AID-EQE659>3.0.CO;2-T

- [19] M. Rassem, A. C. Heidebrecht, and A. Ghobarah, "A simple engineering model for the seismic site response of alluvial valleys," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 199-210, 1995. doi:10.1016/0267-7261(94)00040-N
- [20] B. Poursartip, A. Fathi, and L. F. Kallivokas, "Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, pp. 503-527, 2017. doi:https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.031
- [21] R. Derghoum and I. Derghoum, "Nonlinear finite element analysis for seismic site amplification assessment of urban slopes showing surface geology and topography irregularities," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 166, p. 107729, 2023. doi:10.1016/j.soildyn.2022.107729
- [22] Z. Zhang, J.-A. Fleurisson, and F. L. Pellet, "A case study of site effects on seismic ground motions at Xishan Park ridge in Zigong, Sichuan, China," *Engineering Geology*, vol. 243, pp. 308-319, 2018. doi:10.1016/j.enggeo.2018.07.004
- [23] J. Baron, I. Primofiore, P. Klin, G. Vessia, and G. Laurenzano, "Investigation of topographic site effects using 3D waveform modelling: amplification, polarization and torsional motions in the case study of Arquata del Tronto (Italy)," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 677-710, 2022. doi:10.1007/s10518-021-01270-2
- [24] T. A. Burkhart, D. M. Andrews, and C. E. Dunning, "Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: A review with recommendations associated with the modeling of bone tissue," *Journal of Biomechanics*, vol. 46, no. 9, pp. 1477-1488, 2013. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.03.022
- [25] C. A. Felippa, "Introduction to finite element methods," *University of Colorado*, vol. 885, 2004.
- [26] A. Javidinejad, "FEA Practical Illustration of Mesh-Quality-Results Differences between Structured Mesh and Unstructured Mesh," *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, p. 168941, 2012. doi:10.5402/2012/168941
- [27] A. Nemade and A. Shikalgar, "The Mesh Quality significance in Finite Element Analysis," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 44-48, 2020.
- [28] J. R. Rice, "The Aspect Ratio Significant for Finite Element Problems," Purdue University, Department of Computer Science Technical Reports. Paper 454. Rep No: 85-535, 1985.
- [29] M. Hudson, I. M. Idriss, and M. Beikae, "User manual for Quad4m: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using Finite element procedures and incorporating a compliant base," University of California, California, User's Manual 1994.
- [30] Ü. Dikmen, "Zeminlerde sismik dalga sönümünün kesirsel türev yaklaşımı ile modellenmesi," Doktora tezi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of Flight Path Tracking Performance in Linear Control of Thrust Vector

Nuri Atik^a, Serkan Gürkan^b

Submitted: 31.05.2023 Revised: 24.06.2023 Accepted: 19.07.2023 doi:10.30855/gmbd.0705075

ABSTRACT

Keywords: Thrust vector control, jet vanes, control techniques, embedded systems, aerodynamic

¹ This article has been derived from master's thesis titled "Design and Implementation of a Microcontroller Based Thrust Vector Control System" which was prepared by Nuri Atik under the supervision of Dr. Serkan Gürkan, on National Defence University, Alparslan Defense Sciences and National Security Institute.

^a National Defence, Army NCO Vocational HE School, Dept. of Mechatronics Technologies 10100 - Balıkesir, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5203-3646
e mail: natik@msu.edu.tr

^{b,*} National Defence, Army NCO Vocational HE School, Dept. of Electronics and Communication Technologies 10100 - Balıkesir, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2229-3361
e mail: sgurkan@msu.edu.tr

*Corresponding author: sgurkan@msu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: İtki vektör kontrolü, Jet kanatçıkları, Kontrol teknikleri, Gömülü sistemler, Aerodinamik

Missiles and rockets, which are launchable systems with nozzle-based guidance, have a wide range of applications in controlling the flight path of flying systems, utilizing aerodynamic control methods. Currently, thrust vector control systems are used in conjunction with aerodynamic control methods to achieve high maneuverability for these systems. Thrust vector control systems are implemented using various techniques and prove to be highly effective in providing high maneuverability to short-range missile systems, particularly in military domains. This study focuses on the method of jet vanes with mechanical deflectors, which belongs to the fixed-nozzle family. Within the scope of this study, a prototype that allows the investigation of the jet vanes method has been developed, and a test setup has been constructed to control the movements of this prototype. A microcontroller-based architecture was used in the designed and produced system, the jet vanes was controlled by PI and PID control techniques in MATLAB/Simulink environment, and the real-time results were examined. Based on the experimental studies, it has been determined that in the thrust vector control system where thrust is provided by an electric device and guidance is achieved through jet vanes, the performance with PID control is superior to that with PI control.

İtki Vektörünün Doğrusal Kontrolünde Uçuş Yolu Takip Başarımının İncelenmesi

ÖZ

Füze ve roket gibi lüle çıkışlı yönlendirmeye sahip uçar sistemlerin uçuş yolu kontrolünde aerodinamik kontrol (kanat, kanard ve kuyruk) yöntemleri geniş bir kullanım alanına sahiptir. Son zamanlarda gerçekleştirilen uluslararası çalışmalarda, bu sistemlerin yüksek manevra kabiliyetine ulaşmaları amacıyla aerodinamik kontrol yöntemleriyle birlikte itki vektör kontrol sistemlerinin de kullanıldığı görülmektedir. Farklı tekniklerle uygulanabilen itki vektör kontrol sistemleri, özellikle kısa mesafeli füze sistemlerine yüksek manevra kabiliyeti kazandırma noktasında oldukça etkilidir. Bu çalışmada sabit lüle ailesinden, mekanik saptırıcılı özelliklere sahip jet kanatçıkları yöntemi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, jet kanatçıkları yönteminin incelenebileceği bir prototip geliştirilerek hareketlerinin kontrol edilebileceği bir test düzeneği üretilmiştir. Tasarlanarak üretilen sistemde mikrodenetleyici tabanlı bir mimari kullanılmış, jet kanatçıkları MATLAB/ Simulink ortamında oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türev (PID) kontrol teknikleri ile denetlenmiş, gerçek zamanlı alınan sonuçlar irdelenmiştir. Yeryüzüne dik uçuş yolunun takip edildiği deneysel çalışmalarda PI kontrol için maksimum aşma 0,9°, yükselme zamanı 0,02 saniye, yerleşme zamanı 2,41 saniye elde edilirken, PID kontrol için maksimum aşma 0,25°, yükselme zamanı 0,015 saniye, yerleşme zamanı 1,42 saniye elde edilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalar neticesinde itkinin elektrikli bir aygıtla sağlandığı ve yönlendirmenin jet kanatçıkları ile gerçekleştirildiği itki vektör kontrol sisteminde PID kontrol ile başarımın PI kontrole oranla daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

1. Giriş (Introduction)

1900'lerin başlarındaki gelişmelerden bu yana, füzeler modern savaşlarda giderek daha kritik unsurlar haline gelmişlerdir. Genel olarak füze sistemleri stratejik ve taktik füzeler olarak iki sınıfa ayrılabilir. Stratejik füzeler; bilinen, sabit hedeflere doğru uzun mesafeler kat etmek için tasarlanmıştır. Taktik füzeler ise güdüm ve kontrol teknolojilerinin daha kritik olduğu, daha kısa menzilli, manevra yapan ve manevra yapmayan hedefleri takip etmek veya engellemek amacıyla kullanılmaktadır [1]. Stratejik füzeler öncelikle egzoatmosferik koşullarda, taktik füzeler ise en yaygın olarak endoatmosferik koşullarda çalışmaktadır. Modern savaşlarda yeni teknolojilerin üstel bir hızla büyüdüğü görülmektedir. Bu teknolojik ilerlemelerin neticesi olarak, uçar sistemlerin kabiliyetlerinin artmasına paralel olarak füze sistemlerinin kabiliyetleri de hızla gelişmektedir. Taktik füzelerin kullanım alanlarının daha kısa menziller ve engel oluşturabilecek unsurlarla dolu olan alanlarda kullanılmalarından dolayı daha yüksek dönüş ve manevra kabiliyetlerine sahip olmaları gerekmektedir. Bu sebeple, yüksek hücum açısı, yüksek manevra ve yüksek yanal hızlanma kabiliyeti gerekliliklerinin ortaya çıkmasıyla birlikte geleneksel kontrol yöntemlerinden (kuyruk, kanat, kanard vb. aerodinamik kontroller) daha fazlasına ihtiyaç duyulmaktadır [2]. İtki vektör kontrol (İVK) sistemleri bahse konu kabiliyetleri geliştirmek ve iyileştirmek amacıyla ortaya çıkmış sistemlerdir.

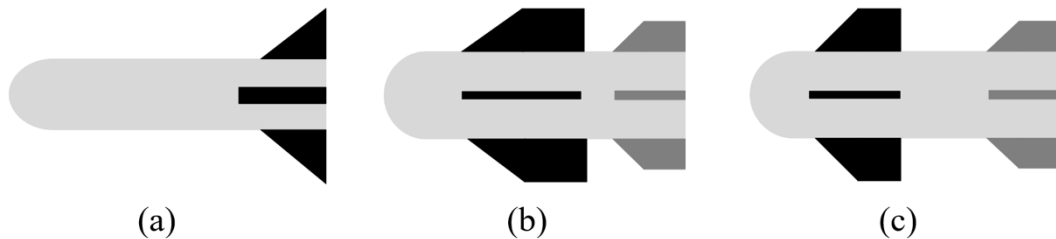
Uçar sistemlerin ve füzelerin uçuş yolu kontrolünde yaygın olarak aerodinamik kontrol (kanatlar, kanatçıklar ve kanardlar) unsurları kullanılmaktadır [3]. Fakat günümüzde uluslararası çalışmalardan görüldüğü üzere, uçar sistemlerin yüksek manevra kabiliyetine erişebilmeleri noktasında tek başına aerodinamik kontrol sistemleri yeterli olmamaktadır [4]. Aerodinamik kontrolün ötesinde yüksek manevra kabiliyetinin kazandırılması amacıyla itki vektör sistemleri kullanılmaktadır [5].

İVK sistemleri, uçakların ve füzelerin uçuş yolunu kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte yüksek manevra kabiliyetine sahip füze sistemlerinde, aerodinamik kontrol sistemler ile İVK sistemlerinin bir arada kullanıldığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında; itki vektör sistemleri arasında yaygın olarak tercih edilen jet kanatçıkları metodu kullanılmış, kanatçıkların denetimi için ise PI ve PID kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen bu algoritmalar, tasarlanarak üretilen prototip sistem üzerinde test edilmiş, elde edilen sonuçlar irdelenmiş, geri beslemeler neticesinde MATLAB/Simulink ortamında hazırlanan algoritmalar üzerinde gerekli iyileştirmeler yapılarak uçuş yolu kontrolünde başarıyı yüksek sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma ile literatürde ilk defa itkinin elektrikli bir aygıtlı sağlandığı ve yönlendirmenin jet kanatçıkları ile gerçekleştirildiği itki vektör kontrol sisteminde, tanımlanan uçuş yolunun takibi sağlanmıştır.

1.1. Aerodinamik kontrol tipleri (Aerodynamic control types)

Özellikle uzun menzilli hava savunma füzelerinde yüksek hücum açılarında, yüksek seviyede manevra kabiliyeti sağladığı için kuyruk kontrollü tercih edilir [6]. Kuyruk kontrollü füzenin basitleştirilmiş yapısı Şekil 1a'da verilmiştir.



Şekil 1. Aerodinamik kontrol tipleri: a) kuyruk kontrollü füze, b) kanat kontrollü füze, c) kanard kontrollü füze (Aerodynamic control types: a) tail-controlled missiles, b) wing-controlled missiles, c) canard-controlled missiles)

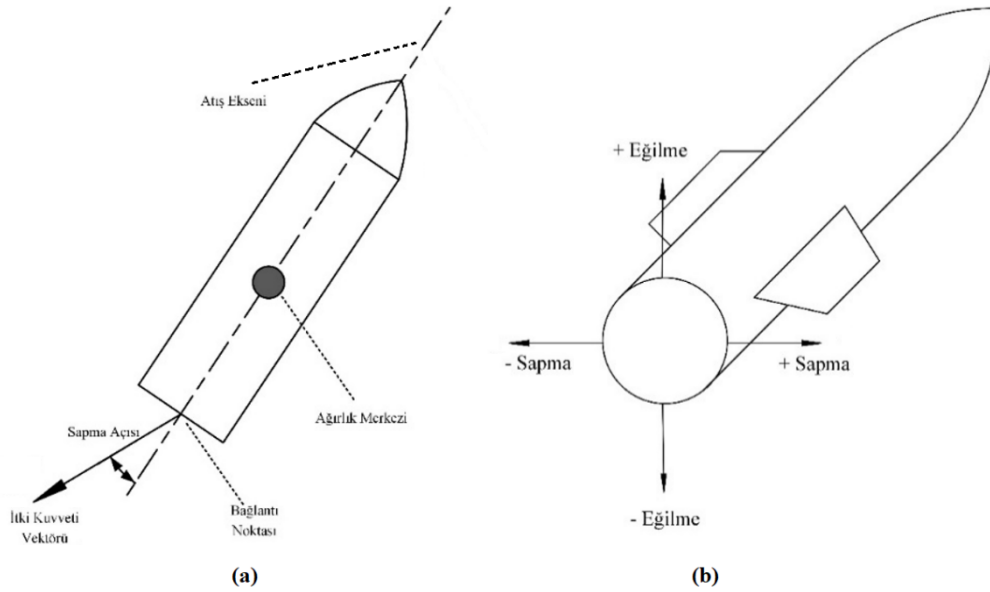
Kanat kontrollü füzeler, ilk geliştirilen füze kontrol tiplerinden olup, günümüz modern füzelerinde daha az tercih edilmektedir. Kanat kontrolünün en büyük avantajı, füzenin çok küçük kanat hareketlerine çok hızlı tepki gösterebilmesidir [6,7]. Kanat kontrollü füzenin basitleştirilmiş yapısı Şekil 1b'de verilmiştir.

Kanard kontrollü füzeler, düşük hücum açılarında çok iyi manevra yeteneğine sahiptirler. Bunun yanında yüksek açılarda akışın ayrılması nedeniyle kontrol etkinliğini kaybeden füzelerdir [8]. Kanard kontrollü füzenin basitleştirilmiş yapısı Şekil 1c'te verilmiştir.

1.2. İtme vektör kontrol sistemleri (Thrust vector control systems)

Uçar sistemlerin ve füzelerin uçuş yollarını kontrol etmek için İVK sistemleri kullanılır. Yüksek manevra kabiliyetine sahip füze sistemleri, aerodinamik kontrol (kanatlar, kanatçıklar, kuyruk ve kanardlar) ve İVK sistemlerinin beraber kullanımını gerektirir. Tüm İVK sistemleri temelde benzer şekillerde çalışır.

İVK sistemlerinde ana itme vektörünün yön çizgisi, aracın ağırlık merkezinden geçmeyecek şekilde saptırılır. Moment, Şekil 2a'da gösterildiği gibi aracın ağırlık merkezi etrafında manevra yapabileceği şekilde oluşturulur [9].



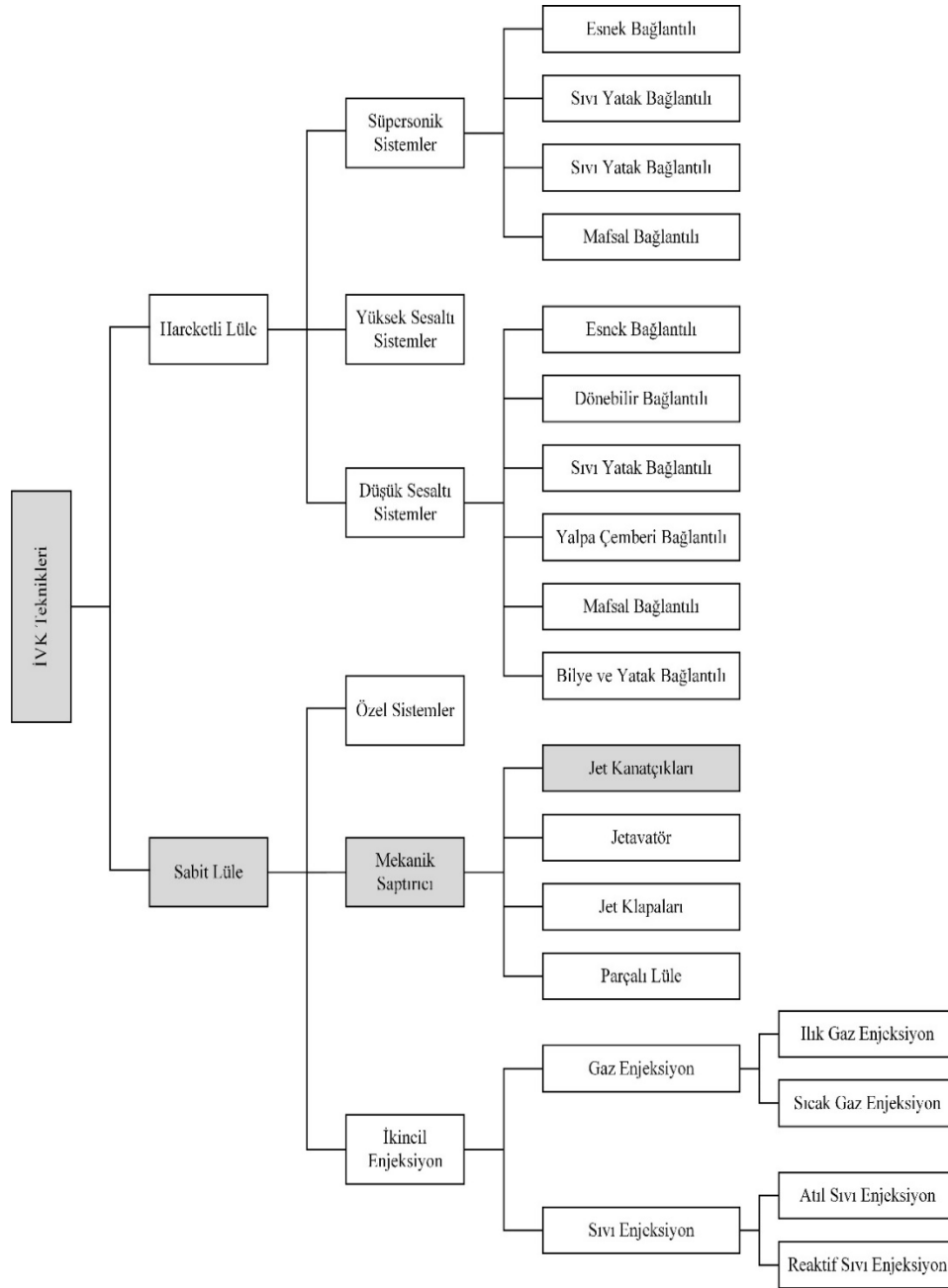
Şekil 2. İVK sistemleri: a) Bir İVK sisteminin çalışma prensibi, b) eğilme ve sapma yönlerinin gösterimi (TVC systems: a) operating principle of a TVC system, b) yaw and pitch directions)

Roket ve füzelerde itme vektörlerinin yönünü kontrol etmek; bir aracın eğilme (yunuslama), sapma ve dönme hareketlerini kontrol etmekle mümkündür [4,10]. Şekil 2b'de İVK sistemlerinde eğilme ve sapma yönleri görülmektedir.

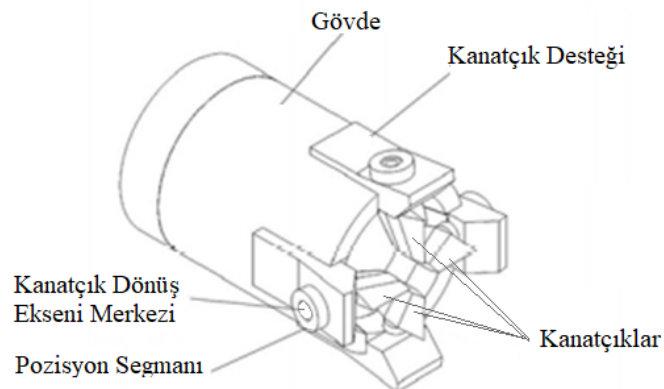
Şekil 3'te İVK sistemlerinin sınıflandırıldığı şema verilmiştir. Bu çalışmada sabit lüle, mekanik saptırıcı, jet kanatçıkları yöntemi tercih edilmiştir.

1.3. Jet Kanatçıkları İVK Sistemleri (Jet vanes TVC systems)

Jet kanatçıkları İVK sistemlerinde, lüle çıkışına yerleştirilen kanatçıklar, lülenin dış hatlarını takip eder. Jet, füze merkez hattına göre oluşturduğu dönme momentlerine ek olarak eğilme ve sapma momentleri oluşturur. Jet kanatçıkları İVK sistemleri ilk olarak Alman V-2 füzelerinde kullanılmıştır [9,11,12]. Jet kanatçıkları İVK sistemine ilişkin basitleştirilmiş yapı Şekil 4'te verilmiştir.



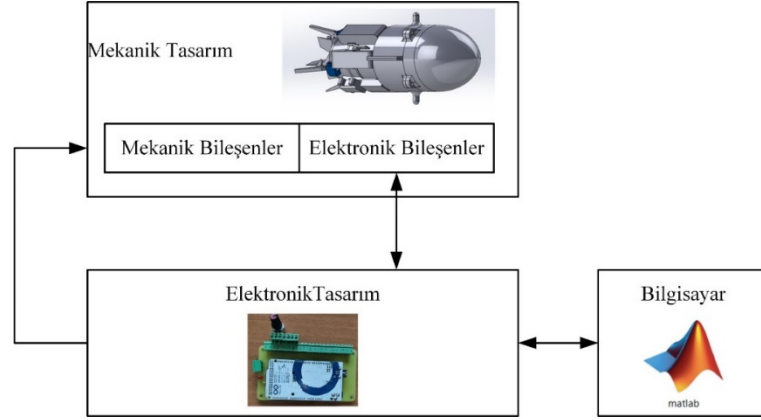
Şekil 3. İVK sistemlerinin sınıflandırılması ve bu çalışmada kullanılan yöntemin gösterimi [2] (Classification of TVC systems and displaying of the method used in this study)



Şekil 4. Lüle tertibatının çıkışına monte edilmiş jet kanatçıkları İVK sistemi [13] (Jet vanes TVC system mounted to outlet of the nozzle mechanism)

2. Materyal ve Metod (Material and Method)

Çalışma kapsamında, jet kanatçıkları İVK yöntemi kullanılarak bir füze sistemi tasarımı gerçekleştirilmiş ve bundan sonraki bölümlerde “mekanik sistem” olarak anılmıştır. Geliştirilen mekanik sistemi kontrol etmek üzere bir elektronik donanım tasarlanarak prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Jet kanatçıkları İVK yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sisteme ait basitleştirilmiş blok şema Şekil 5’te verilmiştir.

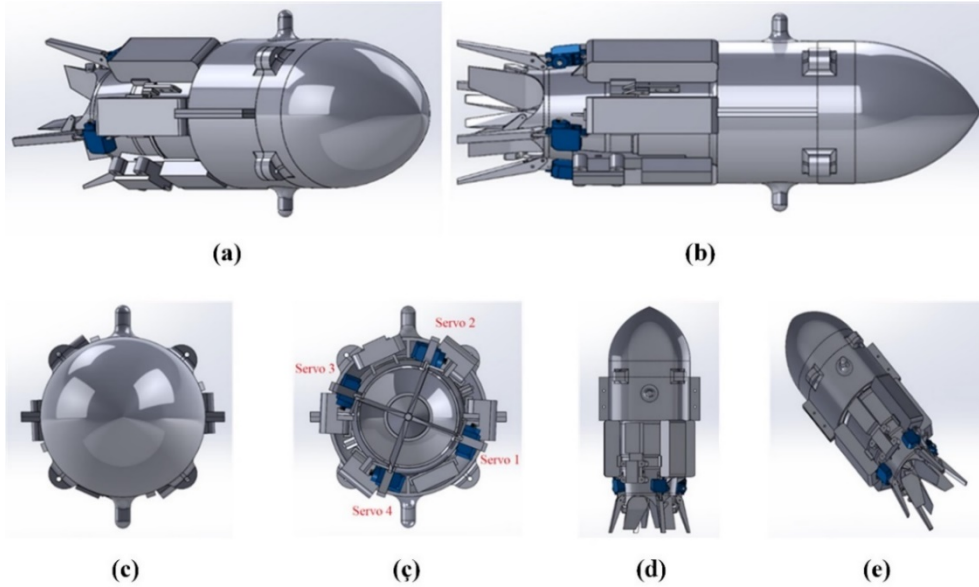


Şekil 5. Jet kanatçıkları İVK yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sisteme ait basitleştirilmiş blok şema (Simplified block diagram of the system realized using the jet vanes TVC method)

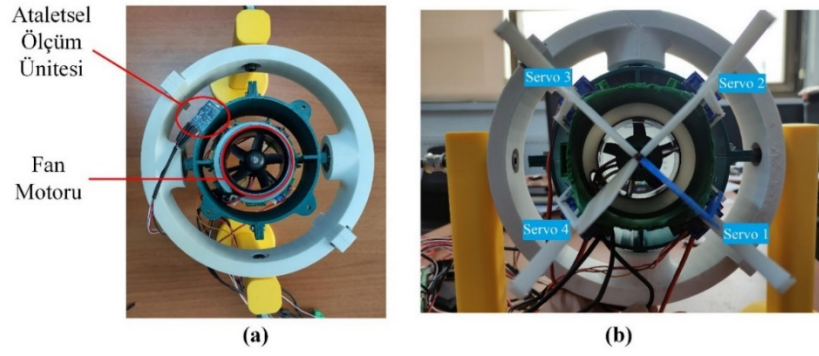
2.1. Mekanik sistem tasarımı (Design of the mechanical system)

2.1.1. 3B prototip tasarımı (Designing of the 3D prototype)

Uygulamada kullanılacak mekanik sistemi geliştirmek üzere 3B ortamda katı model tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tasarlanan mekanik sisteme ait görüntüler Şekil 6’da verilmiştir. Katı model tasarım aşamasında SolidWorks katı model tasarım programı kullanılmıştır. Mekanik sistem üzerinde bulunması gereken ve kanatçıkları kontrol eden servo motorlara ait numaralandırmalar Şekil 6ç’de görülmektedir. 3B modeli oluşturulan sistem 3B yazıcıdan çıktı alınmış ve üretimi gerçekleştirilen sistem deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. 3B çıktısı alınan mekanik sisteme ait görüntüler Şekil 7’de verilmiştir.



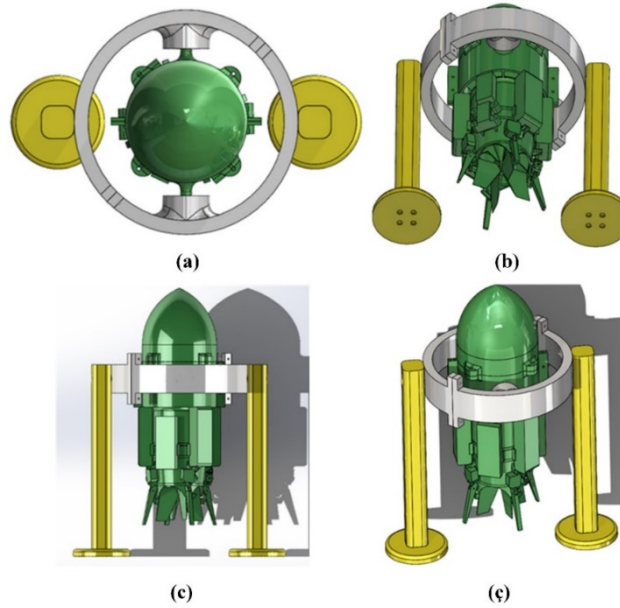
Şekil 6. Prototip tasarımına ait görünüm: a, b, d, e) yandan görünüşler, c) üstten görünüş, ç) alttan görünüş (Views of the prototype design : a,b,d,e) side views, c) top view, ç) bottom view)



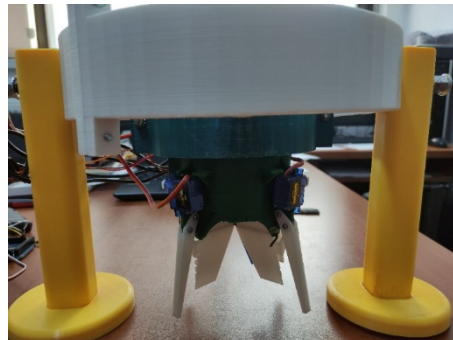
Şekil 7. Mekanik sistem prototip görüntüleri: a) Üstten görünüş, b) Alttan görünüş (Views of the mechanical system : a) top view, b) bottom view)

2.1.2. Test platformu tasarımı (Designing of the test platform)

Tasarımı gerçekleştirilen mekanik sistem üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmek üzere iki eksende hareket serbestliğine sahip bir test platformu geliştirilmiştir. Bu kapsamda Şekil 8’de görünümü verilen test platformunun katı modeli tasarlanmış ve 3B yazıcı ile üretilmiştir (Şekil 9). Test platformu x ve y eksenlerinde $\pm 45^\circ$ ’ye kadar hareket serbestliği sağlamaktadır. Bu serbestlik değeri giriş bölümünde ele alınan tüm İVK sistemlerinde kullanmak için uygun bir değerdir. Kurulan test platformunda, bağlantı noktalarında 12 mm’lik düşük sürtünmeye sahip rulmanlar kullanılarak hareket serbestliğinde sürtünme için optimum şartların oluşması hedeflenmiştir.



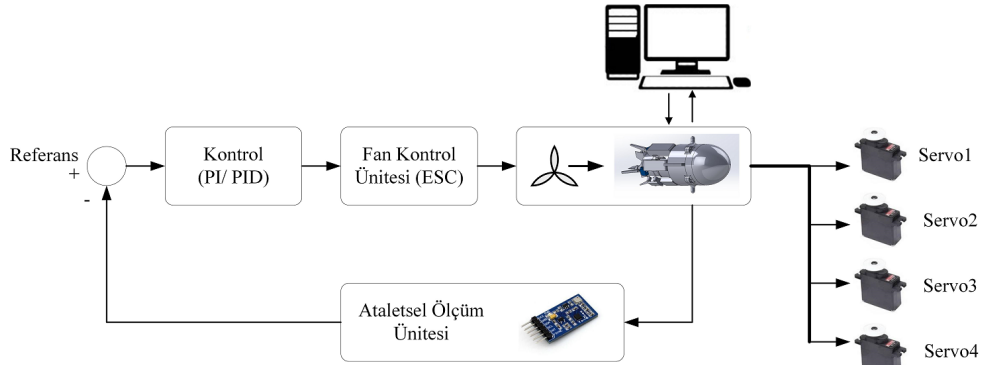
Şekil 8. Test platformuna ait 3B katı model tasarım görüntüleri: a) üstten görünüm, b, c, d) yandan görünüm (3D solid model design images of the test platform: a) top view, b,c,d) side views)



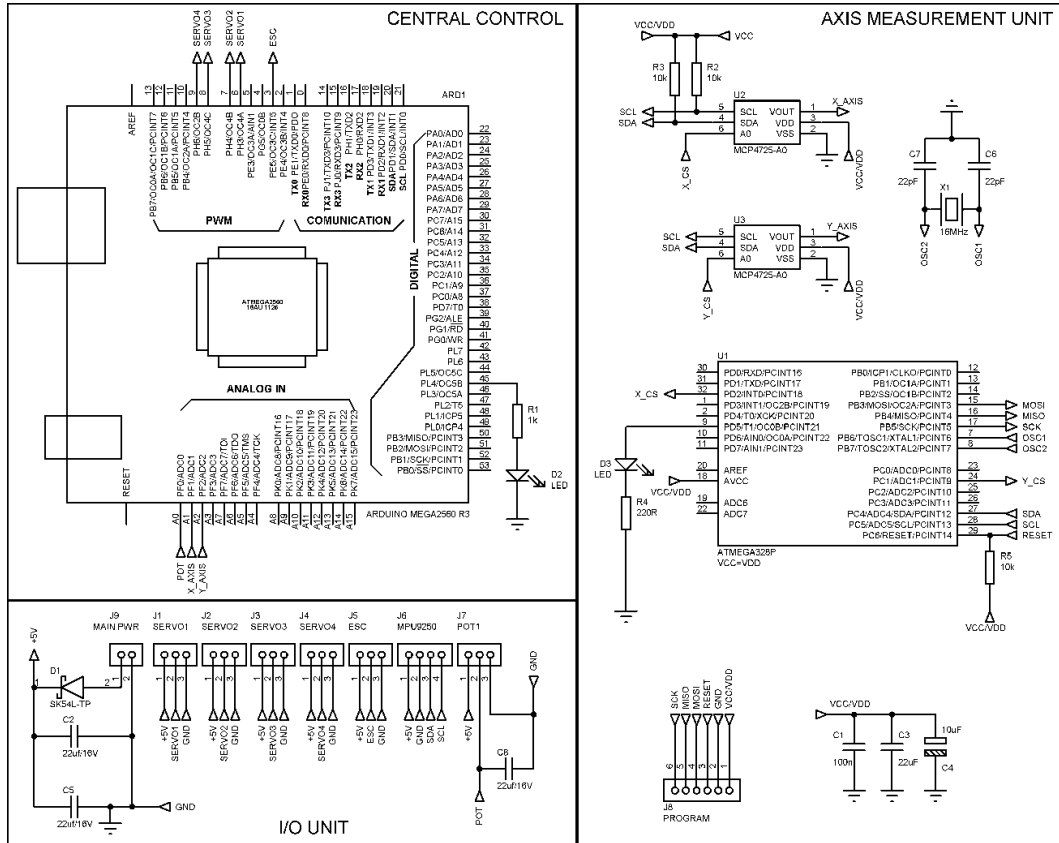
Şekil 9. Test platformunun görünümü (Appearance of the test platform)

2.2. Elektronik donanım tasarımı (Design of the electronic hardware)

Sistemde itki oluşturmak için hava akışından faydalanılmış, bu hava akışını oluşturmak için ise kontrol ünitesine sahip fırçasız doğru akım (BLDC) motoru içeren bir fan kullanılmıştır. Oluşturulan hava akışını yönlendirmek ve itki vektörünü kontrol etmek üzere dört adet servo motor kullanılmıştır. Sistemde füze pozisyon ölçümleri, servo motorların kontrolü ve BLDC motor denetimi için ATMEGA2560 mikrodenetleyici tabanlı bir elektronik donanım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elektronik donanıma ait basitleştirilmiş blok şema Şekil 10'da, devre şeması ise Şekil 11'de verilmiştir. Sistem bileşenlerinin üretilen devre kartına bağlantıları ise Şekil 12'de verilmiştir.



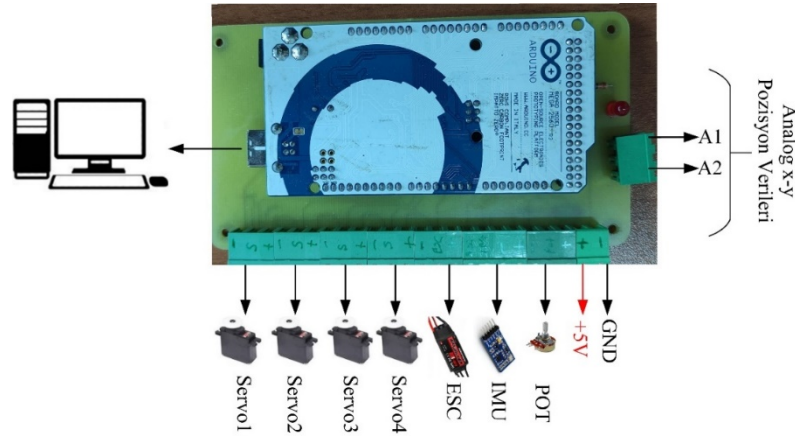
Şekil 10. Elektronik donanıma ait basitleştirilmiş blok şema (Simplified block diagram of electronic hardware)



Şekil 11. Elektronik donanıma ait devre şeması (Circuit diagram of electronic hardware)

Şekil 11'de verilen devre şemasında, referans sinyali J7'den bir potansiyometre yardımıyla 0~5V aralığında uygulanmaktadır. İtki oluşturmak için kullanılan fana ait BLDC'yi kontrol etmek için bir ESC bulunmaktadır. ESC'yi kontrol etmek için mikrodenetleyiciden bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) çıkışı ayrılmış ve bu çıkış devrede J5 konnektörüne aktarılmıştır. İtki vektörünün kontrolü için kullanılan dört adet servo motorun kontrolü için mikrodenetleyicide dört farklı PWM çıkışı ayrılmış ve bu çıkışlar J1, J2, J3, J4 konnektörlerine aktarılmıştır. x-y doğrultularındaki pozisyon ölçümü için MPU9250 ataletsel ölçüm ünitesi kullanılmış, bu ünite ile ölçülen pozisyon verileri devrede kullanılan iki adet MCP4725-A0 sayısal-analoğa çevirici ile

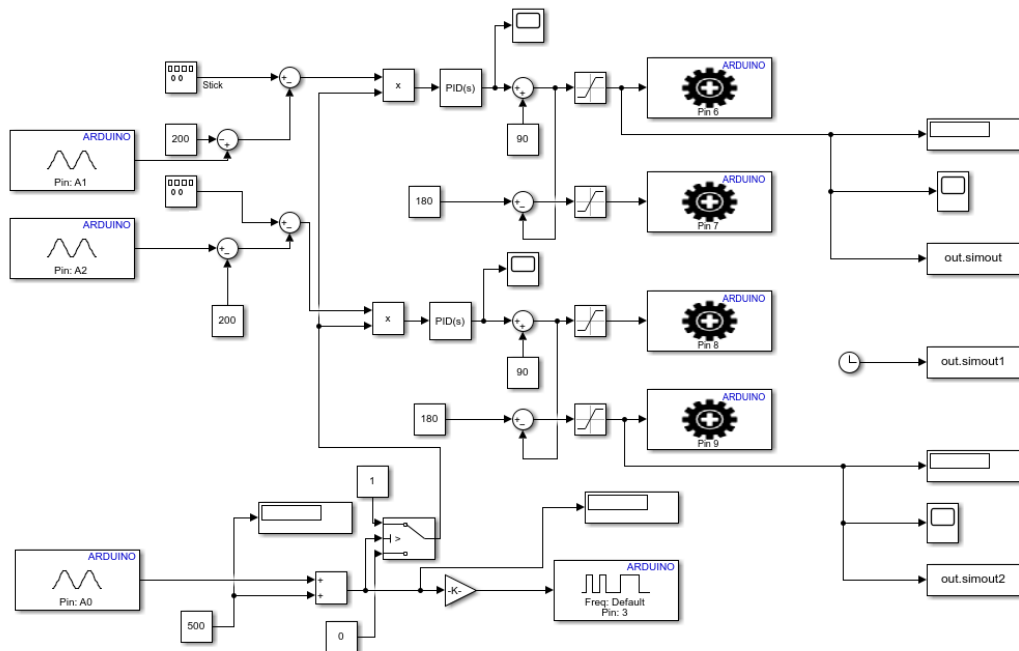
0~5V aralığına dönüştürülmüştür. Tasarlanan elektronik donanım sayesinde kapalı bir çevrim oluşturulmuş ve itki vektörünün kontrol edilebilmesi için gerekli tüm şartlar sağlanmıştır. Tasarlanan İVK sistemi üzerinde, oransal-integral (PI) ve oransal-integral-türev (PID) kontrol algoritmaları kullanılarak en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 12. Sistem bileşenlerinin devre kartına bağlantısı (Connection of system components to the circuit board)

2.3. Jet kanatçıkları modelinde uygulanan kontrol tasarımı (Implemented control design in the jet vanes model)

Jet kanatçıkları kontrol yönteminin MATLAB/ Simulink ortamında hazırlanmış modeli Şekil 13'te verilmiştir. Ataletsel ölçüm ünitesinden alınan x ve y eksenlerinin açı bilgileri modele A1 ve A2 pinlerinden analog girdi yapılmaktadır. Modelde görüldüğü üzere pin 6 ve pin 7'ye irtibatlanan servo motorlar ile pin 8 ve pin 9'a irtibatlanan servo motorlar eş zamanlı olarak aynı açı değerleri ile çalışmaktadır. 6 ve 7 numaralı pinlerde bulunan servo motorlar x ekseninde, 8 ve 9 numaralı pinlerde bulunan servo motorlar ise y ekseninde itki vektörünü kontrol etmektedir. Sistem modeli PID kontrol gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış olmasına karşın, türevsel parametre katsayısı '0' verilerek sistem PI kontrol gerçekleştirecek şekilde çalıştırılabilir. Ayrıca oransal, türevsel, integral parametre katsayılarının farklı değerleri için sistem P, PI, PD, PID kontrol sonuçlarını incelemek için kullanılabilir. Bu çalışmada tasarlanan sisteme ilişkin PI ve PID kontrol sonuçları incelenmiştir. Modelden alınan deneysel veriler gerçek zamanlı olarak izlenerek kayıt altına alınabilmektedir.



Şekil 13. Jet kanatçıkları kontrol diyagramına ait MATLAB/ Simulink görünümü (MATLAB/ Simulink view of the jet vanes control diagram)

PI denetleyicide K_p , K_i , PID denetleyicide ise K_p , K_i , K_d parametrelerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada K_p , K_i , K_d parametrelerinin belirlenmesi için Ziegler-Nichols yöntemi kullanılmıştır. John G.

Ziegler ve Nathaniel B. Nichols tarafından 1942 yılında önerilen yöntem, işlem frekans tepki analizine dayanan popüler bir yöntemdir ve nihai kazanç yöntemi olarak da bilinir. Ziegler-Nichols yöntemi ile K_p , K_i , K_d parametreleri belirlenirken, öncelikle denetleyici düşük kazançlı ve türev katkısı bulunmayan kapalı döngüye yerleştirilir. Ardından kazanç ayarlanarak kontrol sisteminin sürekli titreşim yapması sağlanır. Bu durumda elde edilen kazanç nihai kazanç (K_u) ve titreşim periyodu nihai periyod (P_u) olarak adlandırılır. K_u ve P_u değerleri Tablo 1’de yerine yazılarak K_p , K_i , K_d parametreleri belirlenebilir [14].

Tablo 1. Ziegler-Nichols yönteminde parametrelerin elde edilmesi (Obtaining the parameters in the Ziegler-Nichols method)

Kontrol Türü	K_p	K_i	K_d
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2,2$	$P_u/1,2$	-
PID	$K_u/1,7$	$P_u/2$	$P_u/8$

Tüm bu bilgiler ışığında, yürütülen çalışmalar sonucunda K_u değeri 7,14 ve P_u değeri 3,28 elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 1’de yerine yazıldığında PI ve PID kontrol için ihtiyaç duyulan parametreler Tablo 2’deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 2. Sistemde kullanılan parametreler (Parameters used in system)

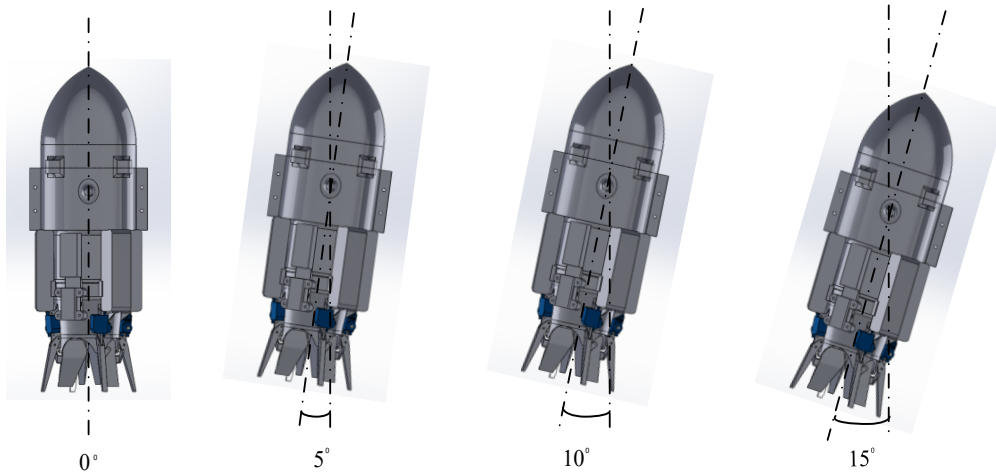
Kontrol Türü	K_p	K_i	K_d
PI	3,25	2,75	-
PID	4,20	1,65	0,41

3. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Tasarlanarak üretilen İVK sisteminin kontrol başarımını değerlendirmek ve en iyileştirme çalışmalarında kullanmak üzere bazı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar dört safhada ve farklı uçuş senaryoları için gerçekleştirilmiştir. Senaryoların tamamında bir uçuş yolunun, belirlenen kontrol tekniği ile takip performansı incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle PI, ardından PID kontrol için çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen tüm veriler gerçek zamanlı olarak kaydedilmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışmalarda MATLAB/ Simulink ortamında geliştirilen ve Şekil 13’te verilen model baz alınmıştır.

3.1. Sabit uçuş yolu tepkisinin incelenmesi (Examination of fixed flight path response)

Sabit uçuş yolu tepkisinin incelendiği senaryo kapsamında, duruş açısına göre 0° , 5° , 10° , 15° ’lik sabit sapma açıları belirlenmiştir. Şekil 14’te, farklı çalışmalar için sistemin izlemesi gereken referans uçuş yolları verilmiştir.

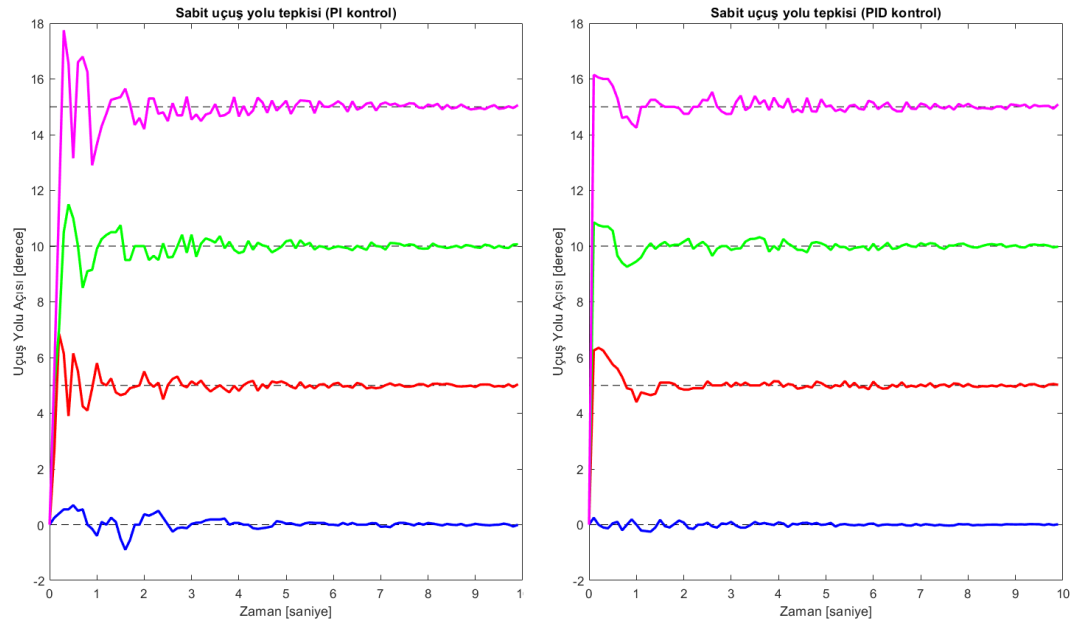


Şekil 14. 0° , 5° , 10° , 15° ’lik sabit sapma açıları için duruş pozisyonları (Standing positions for fixed yaw angles of 0° , 5° , 10° , 15°)

Tüm uçuş yolları için PI ve PID kontroller uygulanarak sistemin belirlenen uçuş yolunu takip edebilme başarımını incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde kontrolcü özelinde elde edilen veriler Tablo 3’te ve elde edilen grafikler Şekil 15’te verilmiştir.

Tablo 3. Sabit uçuş yolu tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen veriler (Data obtained as a result of fixed flight path response experiments)

Uçuş Yolu Sapma Açısı [°]	Kontrol Türü	Maksimum Aşım [°]	Yükselme Zamanı [sn]	Yerleşme Zamanı [sn]
0	PI	0,90	0,020	2,41
5	PI	1,10	0,190	2,83
10	PI	1,50	0,220	3,19
15	PI	2,10	0,240	3,41
0	PID	0,25	0,015	1,42
5	PID	0,60	0,080	1,48
10	PID	0,74	0,060	1,65
15	PID	0,75	0,090	1,71



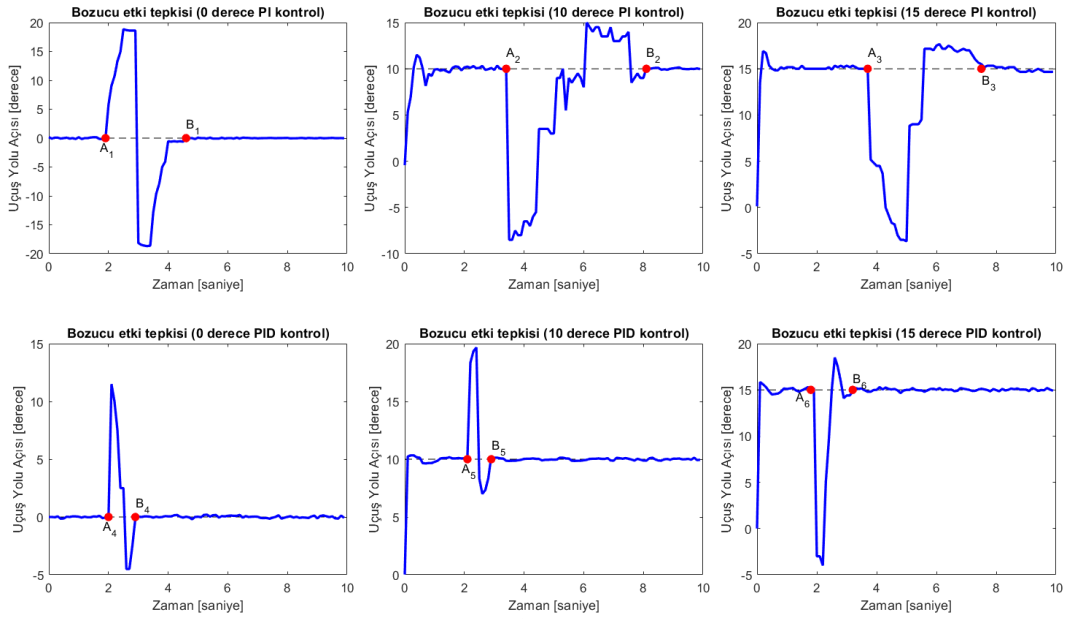
Şekil 15. Sabit uçuş yolu tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen grafikler (Graphs obtained as a result of fixed flight path response experiments)

3.2. Bozucu etki tepkisinin incelenmesi (Examination of the disruptive impulse response)

Bozucu etki tepkisinin incelendiği bu senaryoda üç farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Senaryo kapsamında, duruş açısına göre 0°, 10°, 15°'lik sabit sapma açıları ile uçuş yolu takip eden sisteme 20°'yi aşmayacak şekilde bozucu etki uygulanmış ve buna karşılık sistemin tepkisi incelenmiştir. Tüm uçuş yolları için PI ve PID kontroller uygulanarak sistemin bozucu etkiye rağmen belirlenen uçuş yolunu takip edebilme başarımı incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde kontrolcü özelinde elde edilen veriler Tablo 4'te ve elde edilen grafikler Şekil 16'da verilmiştir.

Tablo 4. Bozucu etki tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen veriler (Data obtained as a result of disruptive impulse response experiments)

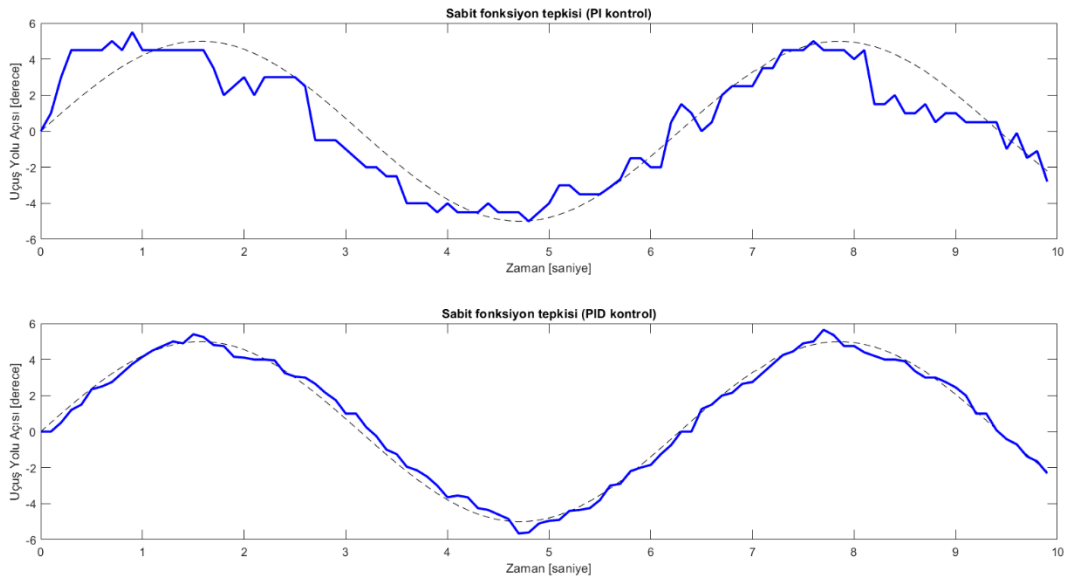
Uçuş Yolu Sapma Açısı [°]	Kontrol Türü	Maksimum Aşım [°]	Yeniden Yerleşme Zamanı [sn]
0	PI	18,85	2,70
10	PI	18,50	4,70
15	PI	18,66	3,80
0	PID	11,50	0,90
10	PID	9,67	0,80
15	PID	19,20	1,40



Şekil 16. Bozucu etki tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen grafikler (Graphs obtained as a result of disruptive impulse response experiments)

3.3. Sabit fonksiyon tepkisinin incelenmesi (Examination of the constant function response)

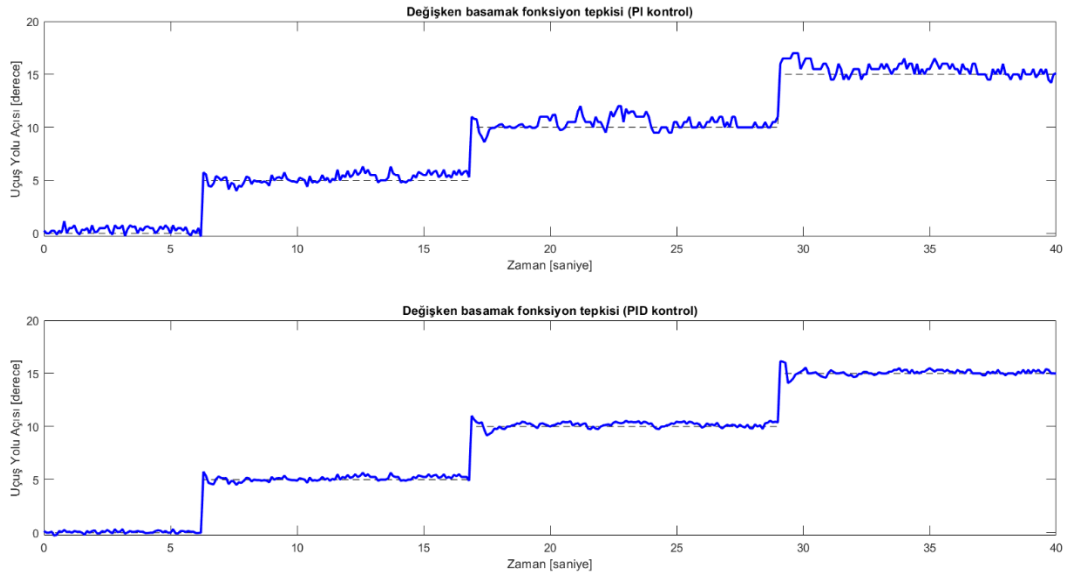
Bu bölümde, sabit sapma açısı ile uçuş yolu takip eden sisteme parametreleri bilinen sabit bir giriş fonksiyonu uygulanmış, bu durumda uçuş yolu davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda 0° sapma açısı ile uçuş yolunu takip eden sisteme giriş fonksiyonu olarak sinüs fonksiyonu uygulanmıştır. Deney sonucunda, elde edilen grafikler Şekil 17'de verilmiştir. Grafik ve deneysel veriler incelendiğinde PI kontrol için $3,2^\circ$, PID kontrol için $0,79^\circ$ maksimum aşımaların elde edildiği görülmektedir.



Şekil 17. Sabit fonksiyon tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen grafikler (Graphs obtained as a result of constant function response experiments)

3.4. Değişken basamak fonksiyon tepkisinin incelenmesi (Examination of the variable step function response)

Değişken basamak fonksiyon tepkisinin incelenmesi deneyleri kapsamında; uçuş yolu sapma açıları sırasıyla 0° , 5° , 10° , 15° olacak şekilde değişken zaman aralıklarıyla uygulanmış ve sistemin davranışı incelenmiştir. Deneyler sonucunda, elde edilen grafikler Şekil 18'de verilmiştir. Şekil 18 incelendiğinde sisteme referans olarak uygulanan sapma açılarının başarılı şekilde takip edildiği görülmektedir. PI kontrolün uygulandığı deneylerde 0° , 5° , 10° , 15° 'lik uçuş yolları için sırasıyla $0,35^\circ$, $0,24^\circ$, $0,4^\circ$ ve $0,49^\circ$ 'lik ortalama aşımalar elde edilmiştir. PID kontrolün uygulandığı deneylerde ise 0° , 5° , 10° , 15° 'lik uçuş yolları için sırasıyla $0,07^\circ$, $0,12^\circ$, $0,16^\circ$ ve $0,17^\circ$ 'lik ortalama aşımalar elde edilmiştir.

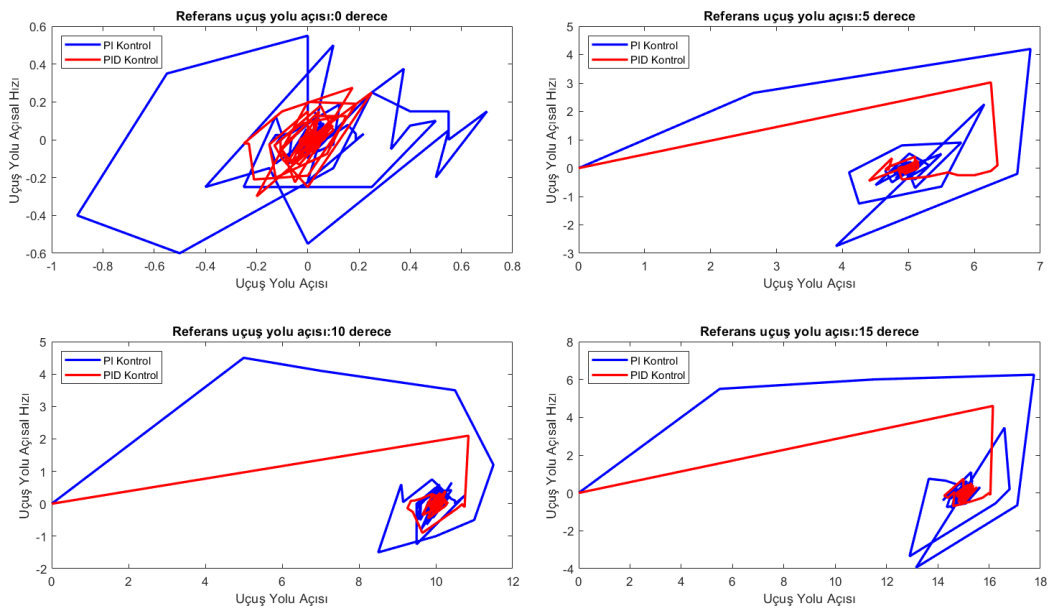


Şekil 18. Değişken basamak fonksiyon tepkisi deneyleri neticesinde elde edilen grafikler (Graphs obtained as a result of variable step function response experiments)

4. Deney Sonuçları ve Tartışma (Experiment Results and Discussion)

Bu çalışmada; İVK tekniklerinden jet kanatçıkları yönteminin kullanıldığı bir test sistemi tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiş, itki vektörünü oluşturmak için elektrik enerjisinden faydalanılarak elde edilen hava kullanılmış, sistemin PI ve PID kontrol altında davranışları deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

Sabit açılı uçuş yolu takibinde sapma açısı arttıkça maksimum aşım, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı parametreleri de kontrol tipine bakılmaksızın artış göstermiş, en iyi parametreler 0° sapma açısı için elde edilmiştir. Bozucu etki tepkisi deneylerinde, 0° uçuş yolu takibi esnasında uygulanan bozucu etkiye karşı PI kontrol ve PID kontrol için sırasıyla 2,7 ve 0,9 saniyelik yerleşme zamanları elde edilmiştir. Uçuş yolunun 5° 'lik tepe sapma açısına sahip bir sinüs fonksiyonu olması durumunda PI ve PID kontrol için sırasıyla $3,2^\circ$ ve $0,79^\circ$ 'lik maksimum aşımlar meydana gelmiştir. Sabit açılı uçuş yolu tepkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, Şekil 19'da verilen faz-düzlem grafikleri elde edilmiştir. Faz-düzlem grafikleri değerlendirildiğinde, sabit açılı uçuş yolu takibinde PID kontrolcü ile elde edilen ortalama sapmanın, PI kontrolcü ile elde edilen ortalama sapmalara göre daha iyi performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen PI ve PID kontrolcülerin Lyapunov kararlılık kriterlerine göre asimptotik kararlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 19. Kontrolcü faz-düzlem grafikleri (Controller phasor diagrams)

Üçüncü bölümde elde edilen deneysel bulgular bir arada değerlendirildiğinde; itki vektörünün kontrolünde PI ve PID denetimlerinin uçuş yolu takibinde etkin olarak kullanılabilceği, PID kontrol için elde edilen yükselme zamanı, maksimum aşma ve oturma zamanı gibi temel denetim parametrelerinin PI kontrol sonuçlarına göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. En iyi uçuş yolu takip sonuçlarının elde edildiği PID kontrol sonuçları literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] A. B. Facciano, K. G. Sybold, T. L. Westberry-Kutz, and D. O. Widmer, "Jet Vane Control System Prototype Hardware Development for the Evolved Seasparrow Missile," *J. Spacecr. Rockets*, vol. 39, no. 4, 2002. doi:10.2514/2.3865
- [2] J. A. Angelo, *Encyclopedia Of Space And Astronomy (Science Encyclopedia)*. Facts on File, 2006.
- [3] P. Giragosian, "Aerodynamic Considerations in The Design A Vertically Launched Advanced Interdiction Missile," in *AIAA 9th Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 1982, pp. 1–10.
- [4] Y. Li, H. Lu, S. Tian, Z. Jiao, and J.-T. Chen, "Posture Control of Electromechanical-Actuator-Based Thrust Vector System for Aircraft Engine," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 9, pp. 3561–3571, 2012.
- [5] A. Sebastian, P. Thomas, and S. Alex, "Servo design and analysis of thrust vector control of launch vehicle," in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 2017, pp. 1–5.
- [6] K. Z. Y. Ang et al., "Development of an unmanned tail-sitter with reconfigurable wings: U-Lion," in *11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)*, 2014, pp. 750–755.
- [7] H. Gao, Z. Liu, B. Wang, and C. Pang, "Flight Dynamics and Control of a New VTOL Aircraft in Fixed-wing Mode," in *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2020, pp. 1650–1657.
- [8] T. Guo, H. Wang, and W. Gai, "Transition flight control for Canard Rotor/Wing rotorcraft," in *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, 2011, pp. 875–880.
- [9] L. M. Wang and B. Mo, "The Design of Jet Vane of Thrust Vector Control System," *Adv. Mater. Res.*, vol. 591–593, pp. 1743–1747, 2012.
- [10] M. F. Ahmed and H. T. Dorrah, "Design of gain schedule fractional PID control for nonlinear thrust vector control missile with uncertainty," *J. Control. Meas. Electron. Comput. Commun.*, vol. 59, no. 3,4, pp. 357–372, 2018.
- [11] H.-G. Sung and Y.-S. Hwang, "Thrust-Vector Characteristics of Jet Vanes Arranged in X-Formation Within a Shroud," *J. Propuls. Power*, vol. 20, no. 3, pp. 501–508, 2012.
- [12] R. Tekin, Ö. Atesoglu, and K. Leblebicioglu, "Modeling and Vertical Launch Analysis of an Aero- and Thrust Vector Controlled Surface to Air Missile," in *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference 2010*, 2010, pp. 1–17.
- [13] A. DeChamplain, V. Harrisson, D. Kretschmer, R. Farinaccio, and R. Stowe, "Optical Technique to Quantify Erosion on Jet Vanes for Thrust Vector Control," in *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2022, pp. 1–4.
- [14] J.-H. Yang and H.-K. Xu, "Robust Controller Design for Non-Minimum Phase UAV System and System Analysis," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70734–70769, 2018. doi:10.1109/ACCESS.2018.2879649

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Prusias Ad Hypium Ancient Aqueducts Of The Roman Period and Loss Occurrences Due To Historical Earthquake

Ali Ateş^{*a}

Submitted: 01.05.2023 Revised: 05.06.2023 Accepted: 05.06.2023 doi:10.30855/gmbd.0705076

ABSTRACT

Keywords: Düzce, Aqueducts, Earthquakes

^aBolu Abant İzzet Baysal University,
Engineering Faculty,
Dept. of Civil Engineering
14030 Center/Bolu
Orcid: 0000-0001-6297-8571
e mail: atesali2000@gmail.com

^{*}Corresponding author:
atesali2000@gmail.com.tr

Turkey is located on the Alpine-Himalayan seismic belt, which is an important earthquake belt of the world. A lot of earthquakes have occurred in Anatolia in historical periods. In addition to this, civilization was established in them in Anatolia and dozens of them were destroyed. Turkey acts as a bridge connecting Europe and Asia, where civilizations intersect in this region. Düzce province is located in a region with high seismicity. The North Anatolian Fault system is dominant in this region. Düzce province is under the influence of the Düzce fault, which is a branch of the NAFZ system. It has been exposed to many earthquakes in historical periods. Recently, two major destructive earthquakes have been shaken on 17 August 1999 and 12 November 1999. There are multiple structures and traces from the Roman period in Konuralp district. The most important of these is the historical ancient Aqueducts. The wreckage of aqueducts still stands witness to history. It is estimated that these arches were damaged in historical earthquakes. Aqueducts still servise outside the district for touristic purposes.

Prusias Ad Hypium Roma Dönemi Antik Su Kemerleri ve Tarihi Depremlerde Yok Oluşları

ÖZ

Türkiye Dünyanın önemli bir deprem kuşağı olan Alp Himalaya deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır. Anadolu'da tarihsel dönemlerde sayısız depremler meydana gelmiştir. Ayrıca Anadolu'da onlarda medeniyet kurulmuş ve onlarcası ise yıkılmıştır. Türkiye bu bölgede medeniyetlerin keşiştiği Avrupa ile Asya'yı birleştiren bir köprü görevi yerine getirmektedir. Düzce ili konum olarak depremselliği yüksek olan bir bölgede bulunmaktadır. Bu bölgede Kuzey Anadolu Fay sistemi (KAFZ) etkisi hakimdir. Düzce ili KAFZ sisteminin bir kolu olan Düzce fayı etkisinde bulunmaktadır. Tarihsel dönemlerde birçok depremlere maruz kalmıştır. Son dönemlerde de 17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde iki büyük yıkıcı depremlerle sarsılmıştır. Konuralp ilçesinde Roma döneminden kalan birden çok yapı ve izler bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ise tarihi antik Su kemerleridir. Su kemerlerinin enkazı hala tarihe tanıklık etmektedir. Bu kemerlerin tarihi depremlerde zarar gördüğü tahmin edilmektedir. Hala ilçenin dışında su kemerleri turistik amaçla görevini sürdürmektedir.

Anahtar Kelimeler: Düzce,
Su kemeleri, Depremler

1. Giriş (Introduction)

Türkiye bölgesel olarak Alp Himalaya deprem kuşağı üzerindedir. Bundan dolayı da aktif tektonik rejimi üzerinde yer almakta olup, kuşak hareketliliği doğrudan doğruya ülkemizi etkilemektedir. Ayrıca ülkemizde etkin olan Kuzey Anadolu Fay sistemi (KAFZ) özellikle ülkemizin kuzeyinden bir baştan diğer başa yaklaşık 1200 km uzunluğa sahip olduğu için Düzce ilini etkilemektedir. Bunun yanında ülkemiz tektonik olarak Arap plakasının kuzeye doğru yönelmesi ile bir sıkışma rejimi altındadır. Bütün bu tektonik yapısal olaylar Düzce ilini etkilemektedir.

Bu bağlamda Anadolu'da birçok medeniyetler tarihsel depremlere maruz kalmışlardır. KAFZ sistemi ana kol ve tali kollara ayrılmıştır [1]. Ülkemizin kuzeyinde doğudan batıya devam eden bir çöküntü alanı mevcuttur. Saros körfezinden başlayarak doğuya doğru Marmara Denizinin kuzeyinde Düzce- Bolu çöküntü hattı bölgesinin de dahil olduğu bir kuşak bulunmaktadır. Bu kuşak Kelkit vadisi, Erzincan Erzurum Pasinler'i içine alarak Aras çukurluğu ile Türkiye'den çıkmaktadır [1, 2]. Bu bölgede aletsel ve tarihsel kayıtlara bakıldığında ciddi sayıda ve büyüklüklerde depremler meydana gelmiştir. Düzce ili bölgesel olarak aktif bir deprem kuşağı üzerindedir. Bölgede tarihsel dönemlerde de çok ciddi depremler yaşanmıştır. Bu aktif rejim Düzce'yi oldukça etkilemiştir. Bu depremlerde can ve mal kayıpları olduğu gibi tarihi yapılarda yıkılmıştır. Düzce ve havzasının zemin formasyonu henüz stabil ve durağan bir yapı değildir. Halen bir sıkışma ve oturma eğilimi göstermektedir. Düzce yakın geçmiş dönemde iki büyük depremle sarsılmış ve çok sayıda can ve mal kayıpları yaşanmıştır. 17 Ağustos 1999 ve 12 Kasım 1999 depremleri meydana gelmiş ve Düzce' de ciddi hasarlar oluşmuştur. Düzce ilinin aktivitesinin yüksekliği bilinmektedir [1,2,3,4].

Bu bölgede birçok medeniyetler depremlerde yıkılmış ve enkaza uğramıştır. Anadolu'da bu tarihi yapıları ve enkazları görmek mümkündür. PRUSİAS AD HYPIUM yerleşim merkezi de bunlardan birisidir. Bu yerleşim merkezinde Roma dönemi tarihi Su yapıları da mevcuttur [5]. Ayrıca Su kemerleri enkazları tarihi depremlerin izini taşımaktadır. Bu su kemeri enkazlarının ise tarihi depremlerde zarar gördüğü ve yıkıldığı tahmin edilmektedir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Çalışma alanı (Study Area)

Araştırma alanı Düzce ili Konuralp sınırları içindedir. Düzce batı Karadeniz bölgesinde yer almakta olup, İstanbul-Ankara oto yolu üzerinde bulunmaktadır (Şekil 1). Tarihi bir yerleşim yeridir. Ve değişik adlarla anılmıştır. İlçe merkezinin topografik yapısı düz ve düze yakındır. Konuralp yerleşkesi su kemerlerinin olduğu ilçe ve kentin kuzeyinde yer almaktadır. Düzce ilinin deniz seviyesinden yüksekliği 150 m civarındadır.



Şekil 1. Düzce ili yer bulduru haritası (Duzce Province local map) [6]

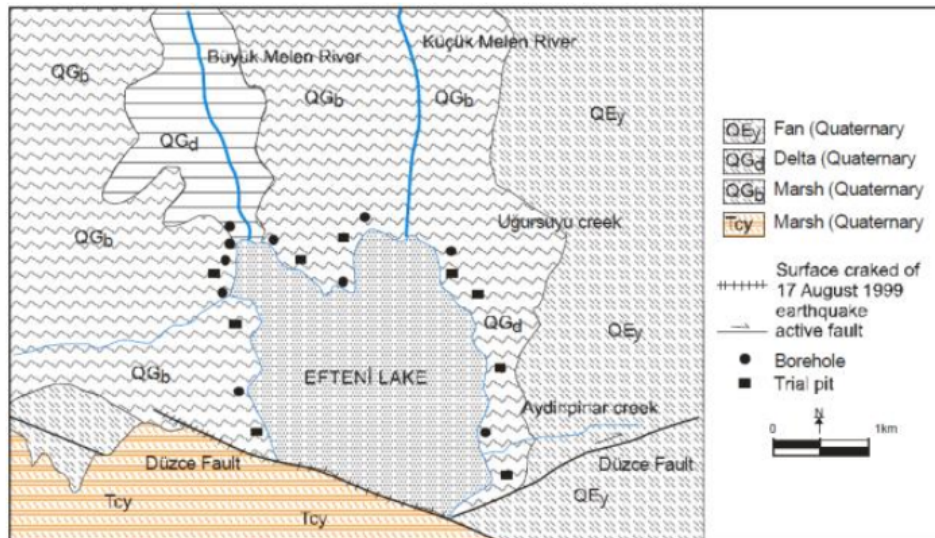
2.2. Çalışma alanının jeolojisi ve depremselliği (Geology and seismicity of area)

Türkiye ülke olarak, Alpin yani Alp Himalayalar sisteminin kuzey ve güney etkisinin altında olduğu sıkışma rejimi altındadır. Herseniye orojenize ait izler genel olarak bozulmuş durumdadır. Çalışma alanı Kuzey Anadolu Fay sistemi etkisi altındadır. Kuzeye ayrılan kol, tektonik olarak yan kollara ayrılmaktadır. Anadolu'nun kuzeyinde doğudan batıya doğru ilerleyen bir çöküntü alanı bulunmaktadır. Saros Körfezinin başlangıcından Marmara'nın kuzeyini de içine alan Düzce- Bolu hattında jeolojik olarak bir çöküntü alanı bulunmaktadır. Bu çizgisel uzantı Kelkit Vadisi, Erzincan, Erzurum Pasinler'i içine alarak Aras çukurluğu ile

Türkiye'den ayrılmaktadır [4]. Düzce, sistematik olarak hareketli bir deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır [4]. Plaka tektoniği açısından çok hareketli ve aktif bir rejim Düzce'yi etkisi altına almıştır. Düzce kent yerleşim yeri zeminleri yerleşmiş ve stabil yapıda değildir. Bundan dolayı da konveksiyon ve çökme davranışları ciddi bir öneme sahiptir. Düzce ili ana kayalardan uzak güney batı yönünde 0.5-3 derecelik bir eğimle düzlükte kurulmuştur.

Düzce yerleşkesi akarsu, kanal ve taşkın bölgesi çöküntü sahası üzerinde yer almakta ve jeolojik olarak açılmaktadır. Yerleşke bölgesinde genç tortu kalınlığı yaklaşık 175-225 m arasında değişmektedir. Asar suyu ve Melen çayı şehrin merkezinden akar gider ve ıslah edilmemiş noktalardan taşar. Kent yerleşkesinin litolojik yapısı daha çok silt ve kil, kısmen de kum ve çakıl kompozisyonundan oluşmaktadır [7]. Güneyden geçen Düzce fayına yaklaşık 10 km. uzaklıkta bulunmaktadır. Taşkın havzasının, taşkından korunmuş alanda kalın bir zemin yapısı oluşmuştur. Kent merkezinde zemin başlangıcından su seviyesi derinliği 2,5-3,5 m arasında değişmektedir ve güney yönünde artan bir şekilde sığlaşmaktadır. Bu azalan su düzeyi seviyesi önemli ölçüde kanal ıslah çalışmaları ve Melen çayının 2,5-4,0 m arasında yatağında gömülmüş oluşu ile daha sonradan meydana gelmiştir. Kent yerleşkesinin güneyi otobana yakın ve ana kayalardan tahminen 1 km., kuzey tarafındaki Çaycuma formasyonundan aşağı yukarı 1,5 km. mesafedeki akarsu etkisinde alüvyal yelpazesi ve gösel çöküntü alanında geniş bir sahada bulunur. Üzerinde bulunduğu alan yapısal litoloji çakıl, kum, silt, kilden oluşmaktadır. Bölge halan tektonik olarak sıkışma etkisinde olduğu için zemin yapısı halan duraylı ve oturmuş değildir. Bu bağlamda, Efteni gölü tüm Düzce baseninin hem su toplama merkezi hem de artarak derinleşen ve genişleyerek açılan depolama sahasıdır. Bu yüzden göl çevresinde 260 m olan çökel kalınlığı artarak sığlaşır. Bu devinimin sürekliliği ile Gölyaka ilçe yerleşkesi jeolojik olarak gelecek dönemde göl içinde kaybolacaktır. Gölyaka ilçesinden akan akarsu yatağı ıslah edilmiş ve derinleştirilmiştir [1,4]. Bundan dolayı yer altı su seviyesi 1,5-2,5 m arasında değişmektedir.

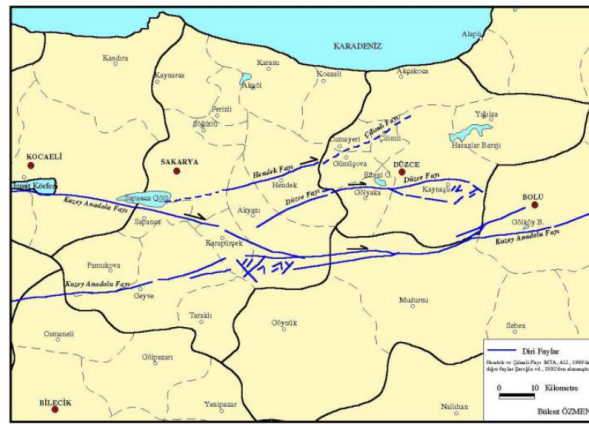
Çilimli ilçe yerleşkesi Çaycuma formasyonu içine saplanmış göreceli eski bir alüvyon yelpazesinin üzerinde, kısmen temel kayalar üzerine yer almaktadır [1, 4, 6]. Hemen önünde Çilimli fayı doğuya doğru yol alır. Mevcut akarsu çayı yelpazeyi derince yarmış ve düşük bir rölyef oluşturmuştur. İlçe yerleşkesinin bulunduğu bölge ve kuzeyi oldukça engebeldir. Ancak buradaki fayların (Çilimli fayı dahil) yakın dönemde bir aktivitesinin olduğu yönünde bir kayıt yoktur. Gümüşova yerleşkesi ise Yığılca üyesi volkanit üzerinde yer almaktadır. Burada litolojik yapı volkanik breş ve tüflerden oluşmaktadır. Yapısal formasyonun üzerinde, topoğrafyaya bağlı olarak 0,5-1,5 kalınlığında zemin yapısı oluşmuştur. Cumayeri yerleşkesi, batıdan gelen geçici mevsimlik bir akarsuyun Melen Çayına ulaştığı yerde bulunmaktadır. Ana kayalar kuzeyden 1 km., güney batıda 2 km. uzaklıkta yer alır. Alüvyon bazlı tortul kalınlığı 100-130 m arasında olduğu ön görülmektedir. Ana litoloji ince kum-silt ve kilden ibarettir. Melen Çayının Menderesli akış rejimi hem drenajı hem de yöredeki tortul çeşidini belirlemektedir. Düzce kent yerleşkesi ve çalışma sahası, kuarterner alüvyal çökellerin fazlaca geniş olarak yayılmış olduğu bir yerleşkedir. Alüvyal malzemeler akarsu yolları boyunca oluşmuştur. Yüksek noktalarda yer yer, andezit ve diabloz türünde volkanik kayalar izlenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma sahasının jeoloji haritası (MTA jeoloji haritasından düzenlenmiştir) (Geology map of study site modified by MTA) [7]

2.3. Aktif faylar ve deprem potansiyeli (Active fault and seismicity potential)

Düzce baseni ülkemizin en önemli aktif faylarından olan Kuzey Anadolu Fayı (KAFZ) üzerinde bulunmaktadır. Bu KAFZ sistemi, doğuda Karlıova noktasından başlayarak ülkenin kuzey kesimini doğu batı yönünde baştan başa bir hat boyunca geçer gider. Bolu bölgesine kadar genelde tek parçalardan oluşur ve bölgede izlenen bu fay, Bolu'nun batı kesiminde (Dokurcum Vadisi) çatallanarak kollara ayrılır. Burada iki temel kola ayrılarak Marmara Denizine doğru ilerler. Sakarya-Düzce yöresindeki Hendek ve diğer faylarda KAFZ sistemine katılır ve KAFZ sisteminin yaklaşık genişliği 40 km'ye ulaşır. Düzce baseninde yer alan yerleşkeler son dönemde bu zonda bulunan aktif fay kollarının meydana getirdiği büyük depremlerin yıkıcı etkisinde kalmıştır. 1944, 1957 ve 1967 yıllarındaki depremler bu KAFZ sisteminin Bolu Abant ve Abant Gölü-Adapazarı Ovası arasında yüzey faylanması sonucu meydana gelmiştir. Düzce basenine en yakın olan ve deprem potansiyeli taşıyan aktif KAFZ sisteminin kolları bu basenini oluşturmuştur. Düzce, Hendek fayları aktif fay yapısına sahiptir. Çilimli fayı ise olası aktif bir faydır. Son zamanlarda etkinliği görülmemiştir (Şekil 3) [1,4].



Şekil 3. Bolu ve Düzce Civarının diri fayları (Active fault existed around the Bolu Düzce provision) [6]

2.3.1. Düzce fayı (Düzce fault)

Düzce Baseninin güney sınırlarında yer alan ve ili çevreleyen KAFZ sisteminin bu kolu Düzce fayı olarak adlandırılmıştır ve uzunluğu ise 70 km civarındadır. Düzce fayı bilinen üç parçadan oluşmaktadır. Ve sağ yönlü doğrultu atımı bir faydır. Akyazı yerleşkesinin sınırları içerisinde kuvaterner öncesi jeolojik zamanda ana kayalar içinde izleri takip edilmektedir. Düzce kesiminde ise Düzce fayı yine kuvaterner yaşlı alüvyonel zeminler ve ana kayalar içinde dokunak olarak takip edilmektedir. Son dönemlerde bu fayın etkinliği morfolojide fay ani iniş ve çıkışları arazi değişimleri, yer değiştirmiş dereler ve sırt şeklinde oluşan yapısal yükseltiler Düzce fayının etkinliğini gösteren anomalilerdir. Bu fay 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihinde iki kez kırılmıştır [1,4,6]. 17 Ağustos'ta kırılan ve 130 km uzunluğa sahip olan bu parçanın 30 km'lik doğu bölümü Düzce Fayına aittir. 17 Ağustos depremi KAFZ sisteminin Düzce kolu bölümünde de oluşmuştur. 12 Kasım'da meydana gelen kırılma ise Düzce kolunun doğu kesiminde Efteni Gölü ile Bolu ilinin kuzey batısında yer alan Pirahmetler kesiminde kırılmıştır ve uzunluğu yaklaşık olarak 45 km'dir [1,4,6,7,8].

2.3.2. Hendek fayı (Hendek fault)

Düzce baseninin batı tarafında Sapanca Gölü ile Hendek Yerleşkesi ve Cumayeri hattında yer alan Kuzey doğu, Güney batı yönlü olan bu fay Hendek adıyla bilinmektedir. Bu fay tahmini olarak 50 km ve Sağ yönlü doğrultu atımlı bir faydır. Hendek fayı Sakarya baseninde aslı yüzzer halde görüntülenmiş ve haritaya aktarılmıştır. Bu fayın Hendek ve Cumayeri ortak hattında 25 km'lik parçası yüzeyel olarak çok nettir. Yüzeyde sağ tarafa yönelen, etkin ve büyük basınçlar sonucu gelişen sırtlıklar içinde kuvaterner yaşlı Karapürçek yapısını bu fay kesmektedir. Son depremlerin izleri Hendek Kuzey batısında yarık şeklinde gözlenmiştir. Bu fay üzerinde gözlenen kırıklar sağ yönelimli ve doğrultu atımlı yapısal forma sahiptir. Kırılan parçalar üzerinde yer yer 2-5 cm civarında sağ tarafa doğru yer değiştirmeler meydana gelmiştir [1,4, 6,7,8]. Bu yüzeyde oluşan hareketlilik 17 Ağustos depremine bağlı olarak Hendek kolu üzerinde stres birikiminin varlığını gösteren işaretler olarak düşünülebilir.

2.3.3. Çilimli fayı (Çilimli fault)

Düzce baseninde yerleşkenin Kuzeyinde Cumayeri ile Konuralp arasında ilerler. Çilimli fayı yaklaşık olarak 15 km uzunluğa sahip ve Güney Batı yönünde uzanan Hendek fayının devamında yer almaktadır. Kuzey batı ile Güney doğu uzantılı olan bu fay yerleşkenin Kuzeyinde yer alan Odunluk Dağı ile Düzce baseninde yüzeysel olarak jeolojik uyumsuzluk göstermektedir. Fay hattı üzerinde kaynak dizilimleri izlenmiştir ve Çilimli fayı hareketliliği olan bir fay olarak kabul edilebilir [1,4,6,7,8].

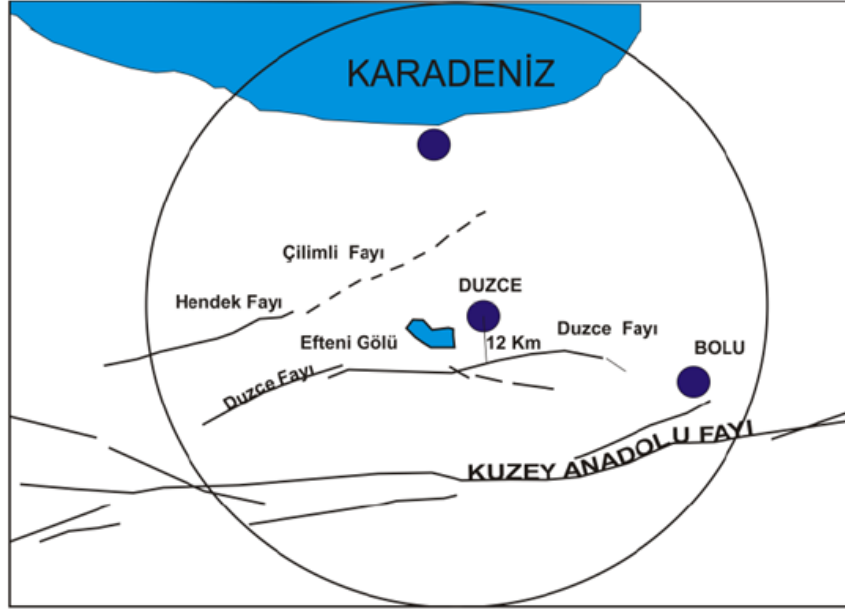
2.3.4. Son yüz yılda meydana gelen depremler (Earthquakes occurred in last century)

Çalışma sahası Kuzey Anadolu Fay sistemi içinde yer aldığı için aktif bir bölgedir. Hem tarihsel hem de aletsel dönem kayıtlarına bakıldığında bu bölgede değişik zamanlarda değişik büyüklükte depremlerin yaşandığı ve farklı medeniyetlerin yıkılıp yok olduğu anlaşılmaktadır [9]. Yakın zamanda bu sahayı etkileyen aletsel veriler (1900- 2016) yıllarını kapsayan etkileyici depremler Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından kayıt altına alınmış ve farklı amaçlar için kullanılmak üzere hizmete sunulmuştur. Bunun için 1900 ila 2016 dönemini kapsayan yıllara ait depremleri derlemek için 100 km çaplı bir alanın içine düşen, magnitüdü 4,5-7,5 arasında olan 131 adet deprem kaydı tespit edilmiştir (Çizelge 1) [10].

Tablo 1. Çalışma alanında 100 km'lik çap içinde meydana gelen tarihsel depremler (The earthquakes occurred in study site in radius of 100 km in historical period) [10]

No	Deprem Kodu	Enlem	Boylam	Derinlik (Km)	Mw	Yer
1	20141022171105	40.406	30.1147	007.5	4.5	Taşoluk-Geyve (Sakarya)
2	20131124204937	40.784	31.8763	007.6	4.6	Ulumescit- (Bolu)
3	20060208040741	40.710	30.3648	008.7	4.5	Arifiye (Sakarya)
4	20040413214722	40.750	31.6400	0010	4.6	Yeniköy- (Bolu)
5	20030521082150	40.780	30.9600	0014	4.5	Yeşilova-Gölyaka (Düzce)
6	20010826004112	40.980	31.5400	0006	4.6	Çiflik-Yığılca (Düzce)
7	20000823134127	40.710	30.7500	0009	5.0	Çamlıca-Hendek (Sakarya)
8	20000214065634	40.980	31.7800	0009	4.8	Yeşilöz-Devrek (Zonguldak)
9	19991213191337	40.700	30.7400	0007	4.7	Çamlıca-Hendek (Sakarya)
10	19991119195907	40.780	30.9700	0009	5.0	Yazlık-Gölyaka (Düzce)
11	19991117081526	40.800	31.4600	0009	5.0	Kızılağıl- (Bolu)
12	19991116175117	40.790	31.6000	0001	4.9	Kozlu- (Bolu)
13	19991113025200	40.780	30.3000	0010	4.7	Çubuklu-Serdivan (Sakarya)
14	19991113005400	40.720	31.0000	0010	4.7	Bakacak-Gölyaka (Düzce)
15	19991112222100	40.750	31.3900	0010	4.8	Darıyeribakacak-Kaynaşlı (Düzce)
16	19991112205400	40.760	31.3800	0010	4.5	Darıyeribakacak-Kaynaşlı (Düzce)
17	19991112200500	40.740	31.0000	0010	4.5	Yunusefendi-Gölyaka (Düzce)
18	19991112191600	40.740	31.3800	0010	4.7	Yeşiltepe-Kaynaşlı (Düzce)
19	19991112190700	40.770	31.2000	0010	4.5	Güven- (Düzce)
20	19991112182400	40.760	31.1100	0010	4.7	Aydınşınar-(Düzce)
21	19991112181400	40.750	31.3600	0010	5.0	Yeşiltepe-Kaynaşlı (Düzce)
22	19991112180500	40.700	31.7000	0010	4.7	Demirciler- (Bolu)
23	19991112175700	40.740	31.4000	0010	4.8	Darıyeribakacak-Kaynaşlı (Düzce)
24	19991112175400	40.770	31.2600	0010	4.7	Fındıklı-Kaynaşlı (Düzce)
25	19991112175200	40.760	31.2200	0010	4.8	Özyanık- (Düzce)
26	19991112174700	40.720	30.9500	0010	4.8	Saçmalışınar-Gölyaka (Düzce)
27	19991112173000	40.750	31.4500	0010	5.2	Elmahık- (Bolu)
28	19991112172700	40.750	31.4000	0010	5.2	Darıyeribakacak-Kaynaşlı (Düzce)
29	19991112172300	40.760	31.1600	0010	5.1	Kaledibi- (Düzce)
30	19991112171800	40.740	31.0500	0010	5.4	Hamamüstü-Gölyaka (Düzce)
31	19991112171700	40.750	31.1000	0010	5.2	Aydınşınar- (Düzce)
32	19991112165720	40.740	31.2100	0025	7.2	Uğur- (Düzce)
33	19991111144125	40.740	30.2700	0022	5.7	Asağdıreköy-Serdivan (Sakarya)
34	19991107165442	40.710	30.7000	0010	5.0	Altındere-Akyazı (Sakarya)
35	19990917194906	40.720	30.1000	0015	4.5	Sirinsulhiye-Kartepi (Kocaeli)
36	19990913115528	40.770	30.1000	0019	5.8	Bayraktar-Izmit (Kocaeli)
37	19990831083323	40.780	29.9600	0010	4.6	Izmit (Kocaeli)
38	19990831081051	40.750	29.9200	0017	5.2	Kocaeli
39	19990829101455	40.880	31.2300	0007	4.8	Esentepe- (Düzce)
40	19990822143059	40.740	30.6800	0005	5.0	Ortaköy-Hendek (Sakarya)
41	19990819130412	40.790	30.5800	0006	4.8	Çatalköprü-Akyazı (Sakarya)
42	19990817211407	40.490	31.0200	0006	4.5	Güveytepe-Mudurnu (Bolu)
43	19990817115809	40.570	30.5100	0016	4.5	Belpınar-Geyve (Sakarya)
44	19990817090212	40.770	31.1100	0016	5.0	Cınarlı- (Düzce)
45	19990817031401	40.640	30.6500	0015	5.5	Kuzuluk-Akyazı (Sakarya)
46	19990817000137	40.760	29.9700	0018	7.4	Basiskele (Kocaeli)
47	19790628212209	40.780	31.8500	0000	4.7	Yayladınlar- (Bolu)
48	19700419133341	40.000	30.9000	010.0	5.3	Taycılar-Tepebaşı (Eskişehir)
49	19690212084305	40.700	30.2900	030.0	4.6	Uzunkum-Sapanca (Sakarya)
50	19680328171220	40.500	31.3400	006.0	4.8	Dedeler-Mudurnu (Bolu)
51	19680318054000	40.300	30.5300	039.0	4.7	Yeşilyurt-Adapazarı (Sakarya)

52	19670918233934	40.8600	30.3000	033.0	4.5	Nasuhlar-Adapazarı (Sakarya)
53	19670814200925	40.400	30.3700	025.0	4.8	SERDIVAN(SAKARYA)
No	Deprem Kodu	Enlem	Boylam	Derinlik (Km)	Mw	Yer
54	19670814113419	40.600	30.2700	033.0	4.5	Nailiye-Sapanca (Sakarya)
55	19670814014556	40.700	30.3800	023.0	4.5	Serdivan (Sakarya)
56	19670802153323	40.600	30.4600	030.0	4.5	Kayalar Resitbey-Erenler(Sakarya)
57	19670801010510	40.400	30.4000	046.0	4.5	Aydınlar-Geyve (Sakarya)
58	19670801001334	40.700	30.5200	026.0	4.9	Teketaban-Karapürçek (Sakarya)
59	19670730190548	40.700	30.8000	010.0	4.5	Bakacak-Hendek (Sakarya)
60	19670730185846	40.700	30.4600	027.0	4.8	Küçükeşence-Erenler (Sakarya)
61	19670730102510	40.700	30.5600	022.0	4.5	Catalköprü-Akyazı (Sakarya)
62	19670730015718	40.000	30.5800	007.0	4.5	Mesepınarı-Karapürçek (Sakarya)
63	19670730013101	40.200	30.5200	018.0	5.7	Teketaban-Karapürçek (Sakarya)
64	19670730011931	40.700	30.5800	023.0	4.9	Bediltahirbey-Akyazı (Sakarya)
65	19670726091606	40.600	30.6700	021.0	4.6	Şerefiye-Akyazı (Sakarya)
66	19670723231914	40.600	30.6300	015.0	4.6	Taşburun-Akyazı (Sakarya)
67	19670723155709	40.300	30.5900	023.0	4.7	Bıçkıdere-Akyazı (Sakarya)
68	19670723074223	40.700	30.3600	011.0	4.4	Serdivan (Sakarya)
69	19670723044855	40.600	30.3600	033.0	4.9	Boğazköy-Geyve (Sakarya)
70	19670723040339	40.600	30.3500	021.0	4.8	Fındıksuyu-Geyve (Sakarya)
71	19670722234159	40.600	30.5300	030.0	4.9	Karapürçek (Sakarya)
72	19670722220835	40.800	30.5200	040.0	4.6	Hacılar-Adapazarı (Sakarya)
73	19670722212741	41.000	30.4500	049.0	4.8	Konuklu-Ferizli(Sakarya)
74	19670722212141	41.000	30.4500	049.0	4.9	Konuklu-Ferizli(Sakarya)
75	19670722203540	40.790	30.4200	004.0	5.0	Koprubası-Adapazarı (Sakarya)
76	19670722194730	41.070	30.5900	059.0	4.9	Konacık-Karasu (Sakarya)
77	19670722181400	40.700	30.8000	010.0	4.5	Bakacak-Hendek (Sakarya)
78	19670722180955	40.720	30.5100	035.0	5.4	Ekinli-Erenler (Sakarya)
79	19670722180854	40.700	30.8000	010.0	4.8	Bakacak-Hendek (Sakarya)
80	19670722174806	40.660	30.6200	026.0	5.2	Alağaç-Akyazı (Sakarya)
81	19670722173007	40.730	30.5300	010.0	5.1	Bediltahirbey-Akyazı (Sakarya)
82	19670722171854	40.700	30.8000	010.0	4.5	Bakacak-Hendek (Sakarya)
83	19670722171410	40.700	30.8000	006.0	5.5	Bakacak-Hendek (Sakarya)
84	19670722165658	40.670	30.6900	033.0	6.2	Güzlek-Akyazı (Sakarya)
85	19670407174007	40.000	31.0000	010.0	4.5	Belkese-Alpu (Eskişehir)
86	19661230015709	40.740	30.7400	031.0	4.5	Süleymaniye-Hendek (Sakarya)
87	19641213140902	40.700	31.0000	010.0	4.5	Camlibel-Gölyaka (Düzce)
88	19581123130738	40.490	30.6900	010.0	4.6	Kasıklıçayşehler-Göynük (Bolu)
89	19570602011200	40.710	30.7800	010.0	4.9	Kızanlık-Hendek (Sakarya)
90	19570601210820	40.680	30.8400	040.0	4.9	Kurtuluş-Hendek (Sakarya)
91	19570601052659	40.750	30.8600	050.0	5.3	Değirmen-tepe-Gölyaka (Düzce)
92	19570530142951	40.650	31.2400	010.0	4.5	Samandere (Düzce)
93	19570530130756	40.620	31.7800	010.0	4.5	Caygökpınar (Bolu)
94	19570529101748	40.830	30.7700	020.0	5.2	Nuriye-Hendek (Sakarya)
95	19570529084752	40.720	31.0400	020.0	4.9	Güzeldere-Gölyaka (Düzce)
96	19570528053348	40.570	31.0200	040.0	4.9	Taşkesti-Mudurnu (Bolu) [
97	19570528000953	40.580	30.5300	050.0	4.9	Ahmediye-Karapürçek (Sakarya)
98	19570527110134	40.730	30.9500	050.0	5.8	Saçmalıpınar-Gölyaka (Düzce)
99	19570527082424	41.130	30.6500	070.0	4.8	Ihsaniye-Karasu (Sakarya)
100	19570527070514	40.840	31.1700	080.0	4.9	Düzce (Düzce)
101	19570527062037	41.140	31.1900	080.0	4.5	Beyhanlı-Akçakoca (Düzce)
102	19570526093638	40.760	30.8100	010.0	5.9	Harmantepe-Hendek (Sakarya)
103	19570526091640	41.420	31.0900	010.0	5.2	Akçakoca Açıkları-Düzce
104	19570526091359	41.340	30.7000	100.0	5.3	Kocaali Açıkları-Sakarya
105	19570526085451	40.600	30.7400	040.0	5.5	Durmuslar-Akyazı (Sakarya)
106	19570526063335	40.670	31.0000	010.0	6.7	Güzeldere-Gölyaka (Düzce)
107	19560714190107	40.320	30.9000	040.0	4.8	Dedeler-Göynük(Bolu)
108	19560106145259	41.000	30.2000	010.0	5.2	Mancarlar-Kandıra (Kocaeli)
109	19520122231500	40.800	30.4000	015.0	4.6	Adapazarı (Sakarya)
110	19491128184718	40.980	30.7400	010.0	4.9	Kurudere-Karasu (Sakarya)
111	19481213020000	41.000	30.0000	015.0	4.5	Hacışeyh-Kandıra (Kocaeli)
112	19450209022800	40.500	31.2000	030.0	5.2	Esenkaya-Mudurnu (Bolu) [
113	19440405044043	40.840	31.1200	010.0	5.6	Mamure- (Düzce)
114	19440202033317	40.740	31.4400	040.0	5.3	Elmalık- (Bolu)
115	19440201060852	40.700	31.2700	010.0	5.3	Samandere- (Düzce)
116	19430906163247	40.210	31.3500	010.0	5.2	Akdere-Nallıhan (Ankara)
117	19430620164757	40.840	30.7300	010.0	5.6	Kahraman-Hendek (Sakarya)
118	19430620153254	40.850	30.5100	010.0	6.4	Türkbeylik Kısıla-Sogütli (Sakarya)
119	19400613110200	41.340	30.1700	030.0	4.8	Ağva Açıkları-Istanbul (Karadeniz)
120	19330515032305	41.260	31.0900	060.0	4.9	Akçakoca Açıkları-Düzce Karadeniz)
121	19330205053000	41.500	31.5000	010.0	4.6	Kozlu Açıkları-Zonguldak
122	19321015221954	40.900	30.6000	015.0	4.7	Aktefek-Hendek (Sakarya)
123	19290427221806	40.510	31.4300	070.0	4.9	Sarpıncık-Mudurnu (Bolu)
124	19290405231815	41.500	31.5000	033.0	4.9	Kozlu Açıkları-Zonguldak Karadeniz)
125	19290405082655	41.610	31.2300	010.0	4.8	Ereğli Açıkları-Zonguldak
126	19280124073611	40.990	30.8600	010.0	5.5	Köyük Pelit-Kocaeli (Sakarya)
127	19261216175405	40.130	30.7200	010.0	5.8	Bey yayla-Sarıcakaya (Eskişehir)
128	19250624000034	40.880	30.3900	010.0	4.8	Kayrançık-Adapazarı (Sakarya)
129	19230529113402	41.000	30.0000	025.0	5.6	Hacı Şeyh-Kandıra (Kocaeli)
130	19070821000000	40.700	30.1000	015.0	5.6	Sirin Sulhiye-Kartepe (Kocaeli)
131	19051022034200	41.000	31.0000	027.0	5.4	Esmâ Hanım-Akçakoca (Düzce)



Şekil 6. Düzce ve çalışma sahasını etkileyen faylar (Faults affecting Duzce province and study site) [11]

Deprem parametreleri Wells and Coppersmith [12]'in önerdiği aşağıdaki eşitlik ile (Eş.1) hesaplanabilmektedir.

$$M_w = 4,86 + 1,32 \log L \quad (1)$$

M_w : Fayın ürettiği enerjiye bağlı deprem büyüklüğü, L ise fay uzunluğunu (km) göstermektedir. Bu hesaba göre Düzce fayı 12 Kasım depreminde olduğu gibi $M_w = 7.2$ büyüklüğünde deprem üretebilir. Yine Düzce fayının hangi büyüklükte ivme üretebileceği Ulusay ve ark.[13]'ün geliştirdikleri eşitlik ile (Eş.2) hesaplamak mümkündür.

$$PGA = 2.18^{0,0218(33,3 M_w - R_e + 7,8427 S_A + 18,9282 S_B)} \quad (2)$$

Eşitlikte yumuşak zeminler için $S_A = 0$, $S_B = 1$ alınır. R_e : yerleşim yerine olan kuş uçuşu en yakın dikey mesafedir. M_w : Deprem büyüklüğüdür. İşlemin sonunda bu fayın 0,51 g büyüklüğünde bir deprem ivmesi potansiyeli olduğu görülmektedir. Son 12 Kasım 1999 depreminde de, Doğu- Batı yönünde 513 cm/sn^2 'lik bir ivme değeri ölçmüştür.

3. Depremlerde Hasar Görmüş Tarihi Prusias Ad Hypium(Konuralp) Su Kemerlerinin İncelenmesi (Examination of Aqueducts in Historical Prusias Ad Hypium(Konuralp) Damaged in Old Earthquakes)

3.1. Prusias ad ,Hypium ve su kemerleri (Aqueducts in Prusias Ad Hypium)

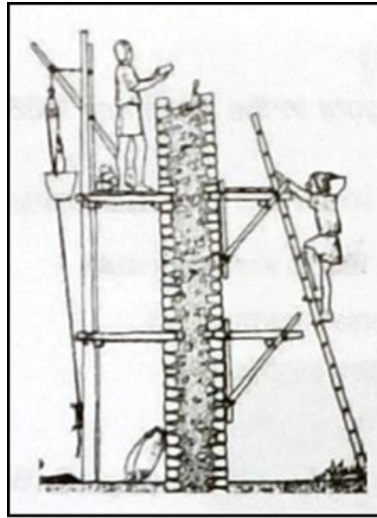
Bithynia kenti olan Prusias ad Hypium, (Konuralp) Yerleşkesinin tarihi M.Ö. 3. Yüzyıla kadar gitmektedir. Yerleşim merkezi küçük Melen çayı (Hypios) kenarında güvenli yer olarak bir tepenin üzerine kurulmuştur. M.S. 3. Yüzyılda elde edilen bazı yazıtlara göre kentin kuruluşunda katkısı olan Megar ve Thabaililer, bir Megara ve Boiotia ortak yerleşimi olan Herakleia'dan getirdikleri Kieros adını buraya vermişlerdir [5,9,14,15]. Bithynia Kralı I. Prusias (M.Ö.228-182) Kieros'u kendi sınırları içine katarak kente kendi adının vermiştir. Aynı şekilde Bursa ve Gemlik'teki diğer Prusias kentlerinden ayrılması için yerleşkeye, Prusias Pros Hypios (Melen Kenarındaki Prusias) denmiştir. Kentte su sorunu olduğu için M.S. 2. yüzyılın başlarında ise P. Domitiuslulianus kente su getirilmesi için maddi destek sağlamıştır [5,9,14,15]. Daha sonra, M.S.3. yüzyılda kentin ileri gelenlerinden aristokratlarından Gavinius Sacerdos kente su kemerleri yapılması konusunda yardımda bulunmuş ve su kemeri yapılmasını istemiştir.

3.2. Prusias ad Hypium (konuralp) kenti roma dönemi su kemerleri (Aqueducts of Roman period in Prusias ad Hypium (konuralp) city)

Eski medeniyetlerde bu günkü tünel açma teknolojisi olmadığı için yer çekimi kuvvetinden faydalanma yoluna gitmişlerdir. Topografya fazla dik eğimli değilse ayak yapmadan da yüzeyde kapalı su kanalları ile suyu istene noktaya iletmışlerdir (Şekil 7). Su kanalları genelde 1/150 ila 1/500 değişen bir eğim ile cazibe etkisinde iletilmektedir (Şekil 7). Yüksekliğin 2 m 'den daha fazla olduğu noktalarda arazinin eğimini korumak amacı ile su kanalı yerine su kemerleri ile suyu iletmek daha çok tercih edilen bir yöntem olmuştur. Bu bağlamda yüksek noktalardan alçak noktaları su taşıırken önlerine çıkan eğimli yerlerde ayaklı kemer yaparak suyu bir noktadan diğer noktaya iletmışlerdir (Şekil 8).

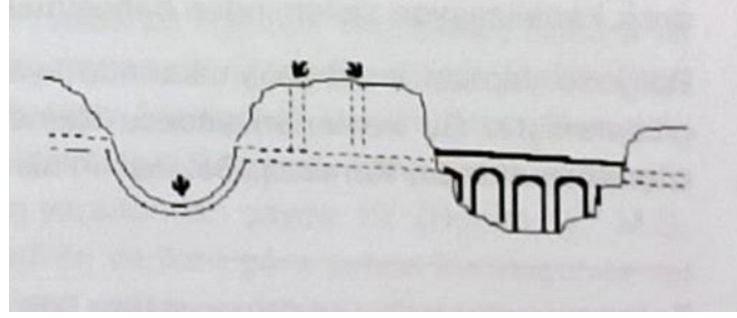


Şekil 7. Düzgün meyilli arazide cazibeli su kanalı (Straight smooth water channel with gravity in site)



Şekil 8. Ayaklı inşaa tekniği (Method of construction with food) [11]

Deniz seviyesinden yaklaşık 214 m yükseklikte bulunan vadinin en düşük seviyesindeki Kemerkasım köyündeki su kemerleri yaklaşık 5 km yerleşkenin Batısında Konuralp yerleşkesine, kentin Kuzeyinde 222 m yükseklikteki noktada bulunan noktaya su kemerleri, tünel ve kanallar ile iletildiği düşünülmektedir (Şekil 7). Bu durumu yine Konuralp beldesinde bulunan moloz taş ile yapılmış su kemerlerinin bulunması Roma dönemine ait olduğunu ve Kasımkemer köyünde de benzer su kemerleri bulunduğun için bu düşüncüyü doğruladığı kabul edilmektedir. Açık kanal yöntemindeki koruma ve sabotaja maruz kalma ve heyelan olması durumunda zarar görme riskini karşı önlem olarak Romalılar tünel ve ayaklı su kemerlerini tercih etmişlerdir (Şekil 9, Şekil 10).



Şekil 9. Tünel, kanal, su kemer (Tunnel, channel, aqueducts) [11]



Şekil 10. Konuralp su kemerleri kalıntısı (Debris of aqueducts in Konuralp) [13]

Düzce ve çevresi deprem bölgesi olduğu için Romalıların yüksek ayaklı su kemerleri yapmaktan kaçındıkları ve bir yükseklik sınırını aşmadıklarını görmekteyiz. Genellikle su kemerlerinin 21 m'nin altında olduğu görülmektedir. Bu yüksekliğe yakın noktalarda su kemerleri daha dar mesafeli ayaklar ise daha kalın inşa edilmiştir. Ancak zorunluluk olması halinde çift katlı alt ve üst ayaklar üst üste gelecek şekilde inşa edilmiştir. Su kemerleri yapmak genelde çok kolaydır. Kemer yaklarının dış yüzeye bakan kısmı kesme taş veya pişirilmiş tuğladan iç kısımları ile moloz taş veya çimentodan yapılıyordu. Kemer duvarlarında hafif malzeme ve yapımda iskele kullanılıyordu. İskeleler yuvalı şekilde ve deliklere sabit bir şekilde monte ediliyor, sökülmesi halinde ise kirişlerin yerleri boşluklu bir hal alıyordu (Şekil 11).



Şekil 11. Kemerde iskele boşlukları (Gap of scaffold in aqueducts) [11]

İmparator Augustus halkın su ihtiyacının karşılanması ve iletimi için M.Ö bir kurul kurmuştur. M.S.97-104 yılları arasında Frontinus başkanlık etmiş ve bu kurulun görevlerini ve kimlerin görevli olduğunu yazdığı kitapta anlatmıştır. Bu kurulda plancı usta ve işçi gibi elamlar bulunduğunu ve su sağlanması ve iletimi konularında çalıştıkları anlaşılmaktadır. Konuralp yerleşkesinde, suyun kaynağı ile kent merkezi arasında tünel, kanal ve su kemerleri ile sağlanan su güzergahı uzunluğunun yaklaşık 9 km olduğu düşünülmektedir.

3.3. Prusias ad Hypium (Konuralp) kenti Roma dönemi su kemerleri kalıntıları (Ruins of aqueducts of Roman period Prusias ad Hypium Konuralp city)

Prusias ad Hypium (Konuralp) kenti çağlar boyunca çeşitli medeniyetlerin beşiği olmuştur. Bu durum kentin bulunduğu yerleşkedeki tarihi izler ve kalıntıların ortaya çıkarılması ile anlaşılmaktadır. Burada gün yüzüne çıkarılan bu kalıntılar çok farklı medeniyetlerin burada yaşadığını göstermektedir. Ateş [9] daha önceki çalışmasında burada farklı kültürel değerlerin geçmiş depremlerde yıkıldığını ve enkazlarının halen Konuralp müzesinde ziyaretçilere açıldığını belirtmektedir. Yine aynı şekilde Su kemerleri de geçmiş depremlerin izini taşımaktadır. Her ne kadar bazı Su kemeri yapılarının moloz ve kesem taşından yapıldığı için tarihe yenik düştüğü düşünülse de aslında bu bölgede yaşanmış büyük depremlerin olduğu tarihsel kayıtlardan da anlaşılmaktadır. Dolayısı ile yapıldığı tarih itibari ile dönemin mimari ve yapı teknolojisine bağlı olarak sağlam yapıldığı bir gerçektir. Zira günümüze kadar tarihin izlerini korumuştur. Roma dönemi Su kemeri yapılarının geçmiş depremlerde yıkıldığı tarihi kaynaklardan anlaşılmaktadır (Şekil 12 - 17).



Şekil 12. Tarihi depremlerin izleri ve yıkılmış Roma dönemi Su kemerleri (Traces of historical earthquakes and debris of aqueducts built in Roman period)



Şekil 13. Depremlerde yıkılmış Roma dönemi su kemerleri (Aqueducts collapsed due to historical earthquakes in Roman period)



Şekil 14. Farklı açılardan çekilmiş yıkılmış tarihi Roma dönemi Su kemeri yapıları (Aqueducts collapsed and various views in Roman period)



Şekil 15. 1900'lü yıllarda ayakta kalabilmiş Roma dönemi Su kemerleri (Aqueducts stands 1900's time in Roman period)



Şekil 16. 1900'lü yıllarda ayakta kalabilmiş farklı açılardan resmi alınmış Roma dönemi Su kemerleri (Aqueducts standing and various views 1900's time in Roman period)



Şekil 17. 1900'lü yıllarda ayakta kalabilmiş ve duyarlı bir vatandaşımızın anılarından kalan ve yıkılmış Roma dönemi Su kemerleri (Aqueducts standing 1900's time and gained from a curious individual in Konuralp in Roman period)

4. Sonuçlar (Discussion)

Bu çalışmada Prusias ad Hypium (Konuralp) kenti Roma Dönemi Su Kemerleri Kalıntılarının varlığı ve tarihi izleri, yıkılma nedenleri araştırılmıştır. Düzce ve çevresi KAFZ sistemi etkisi altındadır. Anadolu Plakası Arap yarım adasının Anadolu plakasını Kuzey batı yönünde diğer ifade ile saatin tersi yönünde döndürmeye çalışması sonucu bu bölge bir depresyona maruz kalarak aktivitesini Kuaternerden beri sürdürmektedir. Bundan dolayı bölge tarihsel dönemde ve aletsel dönemde birçok yıkıcı depreme maruz kalmıştır. Yine Düzce ve çevresinde geçmiş depremlerin izlerine özellikle de Roma dönemi polis sitelerinde han hamam gibi yapılara rastlanmaktadır. Konuralp Müzesi bu konuda oldukça fazla kültürel değerlerle ilgili geçmiş medeniyetlere sahip ve tarihi kalıntılar ziyaretçilere açıktır. Bu bağlamda yine Roma dönemine ait su kemerleri dikkat çekmektedir. O dönemin mimari tarzını yansıtarak o günkü teknolojik imkanlarla 9 km uzaklıkta yerleşik Kemerkasım köyünden bu günkü Konuralp Kent merkezine muhteşem sayılabilecek su yapıları ile su iletilmiştir. Düzce Fayının aktivitesinin deprem üretme potansiyeli şimdi olduğu gibi Roma döneminde de etkin olduğu

düşünülmektedir. Düzce fayı son dönemde 17 Ağustos (Mw=7,2) ve 12 Kasım 1999 (MW=7,1) depremi ile aktivitesini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak dışardan bakıldığında Roma dönemine ilişkin muhteşem sayılacak su kemerlerinin yıkılma nedenleri olarak moloz taşlarının tarihi süreç içinde bozuşmasına bağlı olabileceği ihtimal dahilinde olsa da Düzce Fayının deprem üretme potansiyeli sonucu oluşan depremlerle yıkıldığı sonucuna varılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] MTA Genel müdürlüğü ve Ankara Üniversitesi (A.U), "17 Ağustos 1999 Depremi sonrası Düzce (Bolu) İlçesi Alternatif Yerleşim alanlarının Jeolojik İncelenmesi," *TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu Raporu*, s. 59, Ankara, 1999.
- [2] A. M. C. Şengör ve T. Yılmaz, "Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach," *Tectonophysics*, vol. 75, pp. 181-241, 1981.
- [3] F. Şaroğlu, Ö. Emre, A. Bora, "Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri," MTA. Rap., Ankara, 394, 1987.
- [4] MTA Genel Müdürlüğü ve Ankara Üniversitesi (A.U), "17 Ağustos 1999 depremi sonrası düzce (bolu) ilçesi alternatif yerleşim alanlarının jeolojik incelenmesi," *TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu Raporu*, Ankara, 1999.
- [5] A. Bilir, "Purusias ad Hypium (Konuralp) Su Kemerleri," *Uluslararası 3. Su Kongresi ve Sergisi, 22-23-24 Mart*, Bursa, 2013.
- [6] B. Özmen, "Düzce-Bolu Bölgesi'nin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri," *12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu*, Ankara, 2000.
- [7] A. Ateş, "Gölyaka (Düzce) İmara Esas Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Sismik Hız Verileriyle Sıvılaşma Riskinin Araştırılması," *Politeknik Dergisi*, cilt 20, sayı 4, ss. 753-763, 2017. doi:10.2339/politeknik.368977
- [8] A. Ateş, "Antik Konuralp Kentinde Tarihsel Dönem Depremlerinin Antik Yapılara Etkisinin ve İzlerinin Araştırılması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 25, ss. 582-593, 2021. doi: 10.31590/ejosat.938673
- [10] Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, "23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) Depremi (Mw 6,0) Saha Gözlemleri ve Değerlendirme Raporu," Ankara, 2022.
- [11] R. K. Mark, "Application of linear statistical model of earthquake magnitude versus fault length in estimating maximum expectable earthquakes," *Geology*, vol. 5, pp. 464- 466, 1977.
- [12] L. D. Wells and K.J. Coppersmith, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, no. 4, pp. 974-1002, 1984.
- [13] R. Ulusay, E.Tuncay, H. Sonmez and C. Gokceoglu, "An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey," *Engineering Geology*, vol. 74, no. 3, pp. 265-291, 2004. doi:10.1016/j.enggeo.2004.04.002
- [14] N. F. Jones, "Public Organizationin Ancient Greece," *American Philosophical Society*, vol. 176, 1987.
- [15] F. K. Dörner, "Prusias," *RE*, vol. 5, pp.1128-1147,1957.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of the Shared Electric Scooter System Usage: A Case Study in İstanbul

Ayşe Polat^a, İsmail Adaloğlu^b, Merve Ceyhan Erdoğan^c, Sinem Bozatlı Kartal^d,
Gürcan Sarısoy^{e*}

Submitted: 24.01.2023 Revised: 12.04.2023 Accepted: 19.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705077

ABSTRACT

Keywords: Shared e-scooter, Dockless e-scooter, Electric scooter, Micromobility, Transportation

^a Yalova University,
Engineering Faculty,
Dept. of Transportation Engineering
77200 - Yalova, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4990-0187

^b Yalova University,
Engineering Faculty,
Dept. of Transportation Engineering
77200 - Yalova, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4492-362X

^c Yalova University,
Engineering Faculty,
Dept. of Transportation Engineering
77200 - Yalova, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6588-0545

^d Yalova University,
Engineering Faculty,
Dept. of Transportation Engineering
77200 - Yalova, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8285-6050

^{e*} Yalova University,
Engineering Faculty,
Dept. of Transportation Engineering
77200 - Yalova, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7399-104X
e mail: gurcan.sarisoy@yalova.edu.tr

*Corresponding author:
gurcan.sarisoy@yalova.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Paylaşımlı elektrikli skuter, E-skuter, Paylaşımlı elektrikli scooter, Mikromobilite, Ulaştırma

Shared electric scooters, also known as e-scooters, were introduced to Turkey in 2019, following their worldwide usage since 2017 as a form of micro-mobility. Literature studies conducted at the national level on e-scooters, which are a new type of transportation, are relatively inadequate. In this regard, it is aimed to conduct detailed research on shared e-scooter usage in order to achieve optimal benefits. In this study, an online survey was carried out in İstanbul, which has the highest population in Turkey. Two types of methods were used in the analysis of the obtained data set: chi-square and weighting. Firstly, the significance of the relationship between the participants' categorically organized socio-economic characteristics and their shared e-scooter usage status was examined. The results showed that men (38%), young people (43%), with high levels of education (38%), and with high monthly transportation expenses (45%) had a higher preference for e-scooters. Secondly, significant correlations were found between usage characteristics such as travel distance, frequency of usage, average monthly transportation expense, and preferred second mode of transportation. Lastly the primary reasons for e-scooter usage were presented through the weighting method. Specifically, it was found that the preference of e-scooter users was due to its fun mode of transportation (30%). On the other hand, non-users did not prefer e-scooters due to safety concerns (14%). Additionally, the primary improvement necessary for wider adoption was the provision of dedicated e-scooter lanes (35%).

Paylaşımlı Elektrikli Skuter Kullanımının Araştırılması: İstanbul İli Örneği

ÖZ

Dünyada 2017 yılından beri kullanılan ve mikromobilite araçlarından biri olan paylaşımlı elektrikli skuterler (e-skuter), Türkiye'de 2019 yılında hayatımıza girmiştir. Yeni bir ulaşım türü olan e-skuterlerin incelendiği ulusal düzeydeki literatür çalışmaları nispeten yetersiz görülmüştür. Bu doğrultuda optimum fayda sağlamak için paylaşımlı e-skuter kullanımının detaylı şekilde araştırılması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, Türkiye'nin nüfusu en yüksek ili olan İstanbul'da çevrimiçi anket yapılmış, elde edilen veri setinin analizinde ki-kare ve ağırlıklandırma olmak üzere iki tür yöntem kullanılmıştır. İlk olarak katılımcıların kategorik olarak düzenlenen sosyo-ekonomik özellikleri ile paylaşımlı e-skuter kullanım durumları arasındaki ilişkilerin anlamlılığı incelenmiştir. Buna göre paylaşımlı e-skuteri tercih etme eğiliminin erkeklerde (%38), gençlerde (%43), yüksek eğitim seviyesinde (%38) ve aylık ulaşım gideri fazla olan kişilerde (%45) daha yüksek olduğu görülmüştür. İkinci olarak kullanım özelliklerine ait değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkileri istatistiksel açıdan sorgulanmıştır. Buna göre yolculuk mesafesi, kullanım sıklığı, ortalama aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü parametrelerinin birbirleri ile ilişkilerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Son olarak e-skuter kullanan katılımcıların tercih etmelerinin (eğlenceli bir ulaşım türü olması-%30), e-skuter kullanmayan katılımcıların kullanmamalarının (güvenli bulunmaması-%14) ve kullanımlarını sağlayacak iyileştirmelerin (kendine ait yolunun olması-%35) ağırlıklandırma yöntemi ile birincil çıktıları sunulmuştur.

1. Giriş (Introduction)

Kentlerde nüfusun hızla artması ile trafik yoğunluğu, park alanlarının yetersizliği, hava kirliliği gibi birçok problem ortaya çıkmakta ve kent içi ulaşımında yeni çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de sürdürülebilir ulaşım son yıllarda büyük önem verilmektedir. Sürdürülebilir ulaşımı etkin bir şekilde yönetebilmek için halihazırda kabul gören yaklaşımlardan biri araçların paylaşımlı olarak kullanılmasıdır. Paylaşımlı kullanım, araç sahipliği olmaksızın araçların eş zamanlı veya sıralı bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Paylaşımlı kullanım araçlarından biri olan paylaşımlı elektrikli skuterler (e-skuter) son yıllarda dünyada ve ülkemizde ilgi odağı haline gelmiştir.

E-skuterler hızı en fazla 25 km/sa'e ulaşan, tekerlekli, fren mekanizmasına sahip, ayak tahtası ve tutamağı olabilen, dikey bir direksiyon mekanizması içerebilen, ayakta kullanılan ve lityum iyon pil ile donatılmış şarj edilebilen bataryası olan elektrikli araçlardır [1]–[5]. Teknolojide yaşanan gelişmeler bu araçların mobil uygulamalar üzerinden paylaşımlı olarak kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Mobil uygulamalar ile paylaşımlı e-skuterlerin erişimi ve kullanımının izlenebilirliği kolaylaştırılmıştır. Kullanıcılar uygulama üzerinden buldukları bölgede herhangi bir konumda bulunan e-skuterleri GPS donanımı sayesinde haritada görebilirler. Böylece e-skuterleri kiralayabilir, gidecekleri yere kadar sürebilir ve varış noktasında diledikleri bir yerde park edebilirler.

Dünyada ilk olarak 2017 yılında, ABD'nin Santa Monica kentinde e-skuter kiralama hizmeti başlamış ve bu hizmetler dünya çapında büyük ölçüde genişlemiştir. E-skuter hizmeti sunan bir firma 2018 yılında e-skuter ile dünya çapında 26 milyondan fazla yolculuk yapıldığını açıklamıştır [6]. Türkiye'de ise bu hizmet 2019 yılında İstanbul'da bir firma ile başlamış ve 14 Nisan 2021 tarihinde 31454 sayılı Resmi Gazete ile "Elektrikli Skuter Yönetmeliği" yürürlüğe girmiştir [5]. Artan ilgi sonucu birçok firma pazara dahil olarak farklı kentlere hizmet sunmaya başlamıştır. Hizmet sunan firmaların artışına paralel olarak e-skuter kullanımı da artmıştır. Bu artışla beraber ülkemizde paylaşımlı e-skuter planlamasının uygun ve doğru bir şekilde yerine getirilmesi için kişilerin sosyo-ekonomik ve kullanım durumları ile ilgili akademik çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Buna karşın e-skuterler henüz çok yeni bir ulaşım türü olduğundan mevcut çalışmalar stratejik kararlar verebilmek için yeterli düzeyde değildir. Bu da hem firmalar hem de kullanıcılar için dezavantajlar oluşturmaktadır.

Konunun detaylı irdelenmesi amacıyla geniş kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır. Literatür incelemeleri sonucu gençlerin [7], [8], erkeklerin [8]–[10], yüksek eğitim seviyeli [11]–[13] ve yüksek gelirli kişilerin [10], [11] e-skuter kullanma eğiliminin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Jiao ve Bai [7] yaptıkları çalışmada 2018-2019 tarihleri arasında ABD'nin Austin şehrinde paylaşımlı e-skuter ile yapılan toplam 1,7 milyon yolculuğu incelemiş; e-skuter yolculuklarına ait ortalama yolculuk mesafesini 1,2 km, ortalama yolculuk süresini ise 7,55 dakika olarak hesaplamıştır. Başka bir çalışmada ise mevcut bir e-skuter bulmak için yürüme süresinin nadiren 3-4 dakikayı aştığı ve toplam yolculuk sürelerinin çoğunlukla 10–19 dakika arasında olduğu sonucuna varılmıştır [9]. Slovakya'nın Bratislava kentinde yapılan bir diğer çalışmada, üç farklı ulaşım türünün (e-skuter, paylaşımlı bisiklet ve yürüme) Bratislava'nın banliyölerinden birinden, şehir merkezinden ve şehrin aktarma merkezinden çıkan bir yolcuya göre belirlenen sürede (5, 10 ve 15 dk) ne kadar menzilde alanlar taradığı izlenmiştir. E-skuterler ile yapılan yolculukların üç bölgede de diğer türlere göre daha uzun menzilde alan taradığı görülmüştür [14]. Degele vd. [15] yaptıkları çalışmada da yaş, yolculuk süresi, yolculuk mesafesi ve gelir değişkenlerinin e-skuter pazarlama stratejilerinin belirlenmesinde kritik parametreler olduğunu saptamıştır.

Yeni ulaşım türlerinin ortaya çıkması ile kentlerde mevcut yolculuk türleri arasında geçişler yaşanmaktadır. Yaşanan bu geçişlere sebebiyet veren türlerden biri olarak son yıllarda e-skuterler karşımıza çıkmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda e-skuterlerin özel araç yolculuklarından daha çok toplu taşımayla [9], [14] ve yürüyerek [9], [12] yapılan yolculukları etkilemiş olduğu sonucuna varılmıştır. Eccarius vd. [16] ise yaptıkları benzer bir çalışmada tür değişiminin %50-80'lik kısmını yürüme, bisiklet ve toplu taşıma yolculuklarının oluşturduğunu bulmuştur. ABD'nin Arizona eyaletinde yapılan başka bir çalışmada ise kullanıcıların %57'si paylaşımlı e-skuterin erişilebilir olmaması durumunda yürüme türünü tercih edeceğini belirtmiş, bu da paylaşımlı e-skuterin daha çok yürümenin yerini aldığını ve dolaylı olarak kısa mesafelerde kullanıldığını göstermiştir [8].

E-skuterlerin şehir içinde kullanımının eğlenceli olması, yolculuk süresini optimize etmesi, bisiklete kıyasla kullanım kolaylığına sahip olması bu türü daha cazip hale getirmektedir. Hatta bazı kullanıcılar e-skuterlerin

kullanımının nispeten daha pahalı olduğunu, fakat sürüş keyfinden ötürü bu durumu önemsemediklerini belirtmişlerdir [4], [9]. Bununla birlikte Christoforou vd. [9] yaptıkları çalışmada e-skuterlerin çoğunlukla eğlence, gezme, aile ve arkadaş ziyaretleri gibi zorunlu olmayan yolculuklarda kullanıldığını vurgulamıştır.

Genel olarak yapılan çalışmalara bakıldığında e-skuterler özel araç sahipliğini azaltacak seviyede bir tür geçişine sebep olmamış, bu da çevresel anlamda pozitif yönde bir etki yaratmamıştır. Yine de araştırmacılar gelecekte bu mikromobilitenin teşvik edilip mevcut koşulları daha da iyileştirilirse kullanımının artmaya başlayacağını ve mikro-iklimi iyileştiren, ekolojik fayda sağlayan sürdürülebilir ulaşımın önem kazanacağını vurgulamışlardır [14]. E-skuterler konusunda merak edilen ve araştırılan bir diğer konu ise park alanlarıdır. E-skuter kullanıcılarının varış noktasında istediği herhangi bir yere park edebilmesinin sorunlara yol açabileceği düşünülmektedir. Bu doğrultuda, ABD'nin Kaliforniya eyaletinde park halindeki 530 e-skutere ait fotoğraflar toplanmış; bunların %97'sinin park kurallarına uygun olduğu, %2'sinden daha azının ise engelli geçiş bölgelerini işgal ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Kurallara uygun park eden kişilerin ise %90'ının ya kaldırımların kenarına ya da yaya trafiğinin dışında bir alana park ettiği gözlemlenmiştir [17].

Kelsey C. English vd. [18] ABD'nin Teksas eyaletinde iki farklı acil servise başvuran 124 e-skuter kullanıcısı ile ilgili yaptıkları bir çalışmada, kazaların oluşma nedenlerinin %9,7'sinin motorlu bir araçla çarpışma, %84,7'sinin de araçtan düşme sonucu ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Yaralanmalar içinde baş ve yüz yaralanmalarının %45,5 ile en yüksek oranda olduğu ve sadece 2 kazazedenin kask taktığı sonucuna ulaşılmıştır. Ma vd. [19]'nin yaptıkları çalışmada ise yol yüzeyinin düzgünlüğüne bağlı titreşim seviyesi, kullanıcıların araç üzerinde dengede durabilmesi ve ani frenleme gibi kaza ile ilişkili parametreler incelenmiştir. Buna göre asfalt kaplamalarda e-skuter kullanmanın aynı uzunluktaki beton kaplamalara göre daha az tehlikeli olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya ve yapılan diğer çalışmalara genel olarak bakıldığında, kişilerin e-skuter ile ilgili endişelerinin; kaza yapma olasılığının fazlalığı, kontrolü kaybetme korkusu, sabit olmaması, güvenli bulmama, bozuk yol yüzeyi ve elverişsiz arazi olduğu görülmüştür [8].

ABD'nin Indianapolis kentinde yapılan çalışmada 2018 ile 2019 tarihleri arasında kente ait yüzey sıcaklığı, hava sıcaklığı, görüş mesafesi, nem, yağış ve rüzgar gibi hava durumu ile ilgili verilerin yanında e-skuter ile yapılan yolculuklara ait başlangıç, bitiş noktaları ve kat edilen mesafe verileri kullanılmıştır. Verilerin analizi sonucunda kış aylarında yolculuk sayısının %30-80 oranında düştüğü, buna karşın ortalama yolculuk mesafesi ve süresinin etkilenmediği ortaya konulmuştur [20].

Türkiye'de ise paylaşımlı e-skuter ile ilgili çalışma sayısı son derece sınırlıdır. İstanbul'daki e-skuter kullanıcılarının sosyo-ekonomik özellikleri, yolculuk davranışları, güvenlik sorunları, kullanım nedenleri, karşılaşılan zorluklar ve kiralama ücreti ödeme isteğinin çevrimiçi anket yöntemiyle araştırıldığı tez çalışmasında veriler üzerinden çeşitli çapraz sorgular yapılarak hipotezler oluşturulmuştur. Daha sonra hipotezler sınanarak gruplar arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan ki-kare testi sonucunda e-skuter kullanım sıklığı ile cinsiyet arasında anlamlı bir ilişki bulunmuş, iş durumu ve gelir durumu ile kullanım sıklığı arasındaki ilişki anlamlı çıkmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre; kullanıcılar %57,7 oranında erkek, %51,6 oranında 25-34 yaş aralığındadır. Ayrıca kullanıcıların %69,8'i lisans ve yüksek lisans mezunudur. Tüm bu sonuçlar literatürde incelenen çalışmalardaki sonuçlarla genel olarak benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte e-skutere olan türel kaymalar incelendiğinde, kullanıcıların %67,7'sinin yürüme yerine, %8,9'unun taksi yerine bu türü tercih ettiği belirlenmiştir [21].

İstanbul'da yapılan bir diğer çalışmada e-skuterlerin şehir içinde ihtiyaç duyulduğu yerlere zamanında yerleştirilmesine yardımcı olmak için trafik uygulamaları, sosyal medyadan gelen konum etiketleri ve çevrimiçi anket verileri kullanılmış ve bir karar destek sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır. Yapılan anketler sonucunda kullanıcıların %81,7'sinin 18-36 yaş aralığında olduğu bunların ise %47,6'lık kısmını 24-30 yaş arası kişilerin oluşturduğu görülmüştür. Bu da literatürdeki diğer çalışmalarla benzer sonuçları ortaya koymaktadır [22].

Türkiye'de yapılan bir başka çalışmada, e-skuter kullanımında fayda ve maliyet unsurlarının etkileri araştırılmıştır. Türkiye genelinde 118 kişiye yapılan çevrimiçi anket ile çalışmada; katılımcıların, e-skuter hizmetlerini benimsemelerinde etkili olan faktörler Değer Temelli Benimseme Modeli (DTBM) ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda tüketicilerin e-skuterler ile ilgili algıladıkları değer kullanışlılık, eğlence ve algılanan ücretin etkilediği ortaya çıkmıştır. Türkiye'de tüketicilerin paylaşımlı e-skuter hizmetlerini eğlence amacıyla kullandıkları, hizmet için ödenen ücretin algılanan değer olumsuz etkilediği ve maliyet yükü azaltıldığı takdirde tüketici nezdinde değerinin artacağı belirtilmiştir [10].

E-skuterler ile ilgili kapsamlı bir literatür araştırması sonucunda, bireylerin ve şirketlerin genellikle bu araçlardan maksimum faydayı elde etmek için hangi yöntemleri izleyebileceklerinin irdelendiği görülmüştür. Bu çalışmada, ülkemizde en yüksek nüfusa sahip İstanbul ilinde yapılan çevrimiçi anket çıktıları veri seti olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çevrimiçi anket iki hedef gruba yönelik planlanmıştır. İlk hedef grup paylaşımlı e-skuter deneyimi olan katılımcılardır. Bu katılımcıların sosyo-ekonomik profilleri, paylaşımlı e-skuter kullanım özellikleri ve tercih nedenleri ki-kare testi ve ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak istatistiksel olarak irdelenmiştir. İkinci hedef grup ise paylaşımlı e-skuter deneyimi olmayan katılımcılardır. Burada katılımcıların sosyo-ekonomik profillerinin yanı sıra paylaşımlı e-skuteri tercih etmeme nedenleri, tercih etmelerini sağlayacak iyileştirmeler ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Materyal ve metot bölümü dört kısımda detaylıca irdelenmiştir. Bunlar; anket açıklaması, örneklem dağılımı, akış diyagramı ve kullanılan yöntemler şeklindedir.

2.1. Anket açıklaması (Survey design)

Anket temelde üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; katılımcıların kişisel bilgileri, paylaşımlı e-skuter kullanım bilgileri ve bu türe yönelik katılımcı değerlendirmeleridir. İlgili bölümlerin açıklamaları, anketteki sorular, soru ve seçim türleri Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca anket kapsamında paylaşımlı e-skuter kullananların yanı sıra kullanmayanların da görüşleri alınmıştır. Ancak çalışmada paylaşımlı e-skuter kullanım güzergahları ile ilgili ayrıntılı bir çalışma yapılmamıştır.

Anket sorularına cevap olarak belirlenen seçenekler ve katılımcıların seçim sayısı ile ilgili tanımlamaların açıklaması aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- *Çoklu Seçenek–Tek Seçim:* Bu tür sorularda, cevap için önceden belirlenen seçenekler katılımcıya sunulmakta, sonrasında katılımcı kendisine sunulan seçeneklerden sadece birini seçebilmektedir.
- *Seçenek Yok–Açık Uçlu:* Bu tür sorularda, katılımcıya herhangi bir seçenek sunulmaz, kendisi cevabı bağımsız şekilde girmektedir.
- *Çoklu Seçenek–Çoklu Seçim:* Bu tür sorularda, cevap için önceden belirlenen seçenekler katılımcıya sunulmakta, sonrasında katılımcı kendisine sunulan seçeneklerden belirlenen en yüksek seçme sayısına uyarak seçim yapabilmektedir (Anket kapsamında en yüksek seçme sayısı üç olarak belirlenmiştir ve ilgili verilerin analizinde ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır). Ayrıca bu tür sorularda diğer seçeneği ile katılımcı kendine özgü seçimi de yapabilmektedir.

Çoklu seçenek içerisinde katılımcılara sunulan seçenek metinleri saha gözlemlerinden ve literatür kısmındaki çalışmalardan elde edilen bilgiler kullanılarak oluşturulmuştur. Anket çalışmasında kullanıcı profilinin belirlenmesine yönelik yöneltilen demografik özelliklerin ve e-skuter kullanım bilgilerinin yer aldığı bölümdeki çoklu cevap seçenekleri literatürde yer alan bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir [21], [23]. Çalışmanın bulgular bölümünde de her bir anket sorusunda yer alan seçenekler verilmiş ve yapılan analizler sunulmuştur.

Tablo 1. Anket soruları ile ilgili bilgiler (Information about survey questions)

ANKET BÖLÜMÜ	BÖLÜM AÇIKLAMA	ANKET SORUSU	SEÇENEK SAYISI	SEÇİM SAYISI
Kişisel bilgiler	Katılanlara ait tanımlayıcı	Cinsiyet, eğitim düzeyi, aylık gelir, ehliyet durumu, taşıt sahipliği bilgileri.	Çoklu seçenek	Tek seçim

	istatistikler	İkamet edilen ilçe, yaş, meslek, ort. aylık ulaşım gideri bilgileri.	Seçenek yok	Açık uçlu
		Kendinize ait aracınız var ise hangi tür/türlerde olduğunu belirtiniz.	Çoklu seçenek	Çoklu seçim
Paylaşımlı e-skuter kullanım bilgileri	Paylaşımlı e-skuter kullanımına ait tanımlayıcı istatistikler	Paylaşımlı e-skuteri daha önce hiç kullandınız mı?	Çoklu seçenek	Tek seçim
		Paylaşımlı e-skuter kullanımı için ort. aylık harcamanız?	Seçenek yok	Açık uçlu
		Paylaşımlı e-skuteri hangi ilçede kullanıyorsunuz?	Seçenek yok	Açık uçlu
		Paylaşımlı e-skuteri çoğunlukla nerede kullanıyorsunuz?	Çoklu seçenek	Tek seçim
	Paylaşımlı e-skuter kullanım amacı	Paylaşımlı e-skuter hangi yolculuk amacıyla kullanıyorsunuz?	Çoklu seçenek	Çoklu seçim
	Paylaşımlı e-skuter kullanım mesafesi	Paylaşımlı e-skuteri genellikle hangi yolculuk mesafelerinde kullanmayı tercih ediyorsunuz?	Çoklu seçenek	Tek seçim
	Kullanım amacı ve sıklık ilişkisi	Zorunlu yolculuklarınızda paylaşımlı e-skuteri ne sıklıkta kullanıyorsunuz?	Çoklu seçenek	Tek seçim
		Zorunlu olmayan yolculuklarınızda paylaşımlı e-skuteri ne sıklıkta kullanıyorsunuz?	Çoklu seçenek	Tek seçim
	Paylaşımlı e-skuterin ulaşım türlerine etkisi	Yolculuklarınızda paylaşımlı e-skutere ulaşmadığınızda öncelikle hangi araç türünü kullanıyorsunuz?	Çoklu seçenek	Tek seçim
	Paylaşımlı e-skuterin katılımcılar açısından durumu	Paylaşımlı e-skuterin kullanıcıların görüşleri	Paylaşımlı e-skuter ile ilgili aşağıdaki yargılardan hangisi veya hangileri sizin için tercih sebebidir?	Çoklu seçenek
Zorunlu yolculuklarda paylaşımlı e-skuter kullanmama nedeniniz nelerdir? (Sadece zorunlu olmayan yolculuklarda kullanıyorsa)			Çoklu seçenek	Çoklu seçim
Zorunlu olmayan yolculuklarınızda paylaşımlı e-skuter kullanmama nedeniniz nelerdir? (Sadece zorunlu yolculuklarda kullanıyorsa)			Çoklu seçenek	Çoklu seçim
Paylaşımlı e-skuterin kullanmayanların görüşleri		Paylaşımlı e-skuter ile ilgili görüş ve önerileriniz varsa bizimle paylaşabilir misiniz?	Seçenek yok	Açık uçlu
		Paylaşımlı e-skuteri kullanmama nedenleriniz nelerdir?	Çoklu seçenek	Çoklu seçim
		Paylaşımlı e-skuter ile ilgili verilen iyileştirmelerden hangileri yapılırsa paylaşımlı scooter kullanırsınız?	Çoklu seçenek	Çoklu seçim
		Paylaşımlı e-skuter ile ilgili görüş ve önerileriniz varsa bizimle paylaşabilir misiniz?	Seçenek yok	Açık uçlu

2.2. Örneklem dağılımı (Sample distribution)

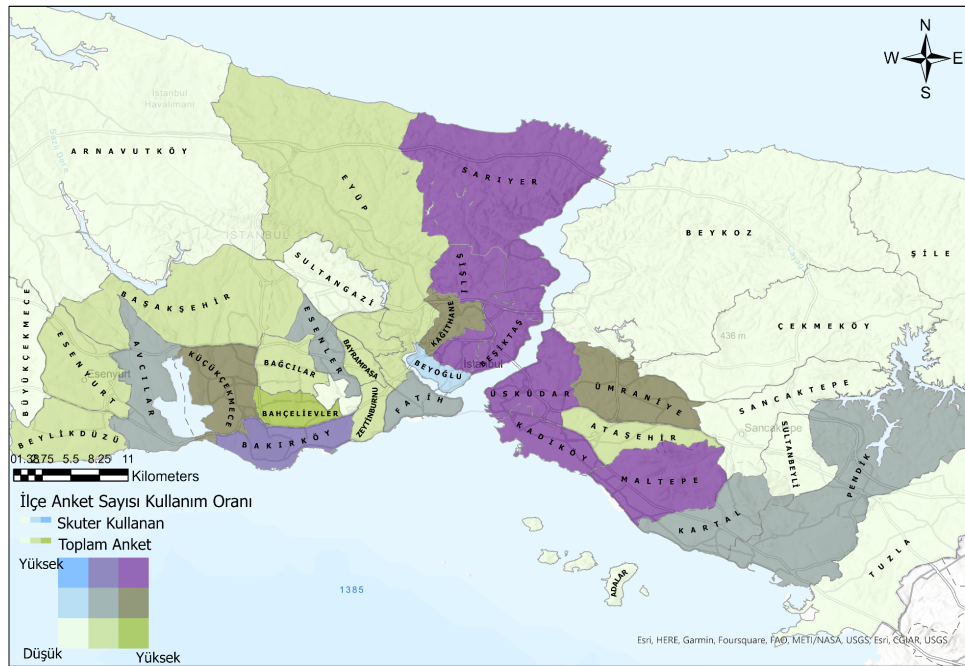
Türkiye’de 2020 yılı Eylül ayına kadar 35 bin e-skuter ile 3 milyonu aşkın kişiye hizmet verilmiştir [24]. İstanbul ilinde ise 2021 yılı Ağustos ayı itibarıyla 52.182 adet e-skuter faaliyet göstermiştir [25]. Bu durumlar, ülkemizdeki e-skuter taşımacılığı sektörünün hızlı büyümesini gösterir niteliktedir. Ayrıca 2021 yılı nüfus değerlerinin yaklaşık olarak Türkiye genelinde 85 milyon, İstanbul ilinde 16 milyon kişi olduğu görülmektedir [26]. Sunulan veriler dikkate alındığında, anket çalışmasının yapıldığı Ocak ile Mart 2021 tarihleri arasında İstanbul ili özelinde e-skuter kullanan kişilerin nüfusa oranının %20’yi geçmediği saptanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda, örneklem sayısının belirlenmesinde kullanılan formül Denklem 1’de verilmiştir [27]. Buna göre; öngörülen e-skuter kullanma oranı ($p=0,20$), öngörülen e-skuter kullanmama oranı ($q=0,80$), z değeri (%5 anlamlılık düzeyi için 1,96), hata payı ($e=0,05$) değerleri için örneklem sayısı 246 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen örneklem sayısına uygun olarak anket çalışmasına 314 kişi katılım göstermiştir.

$$n = \frac{z^2 \times p \times q}{e^2} \quad (1)$$

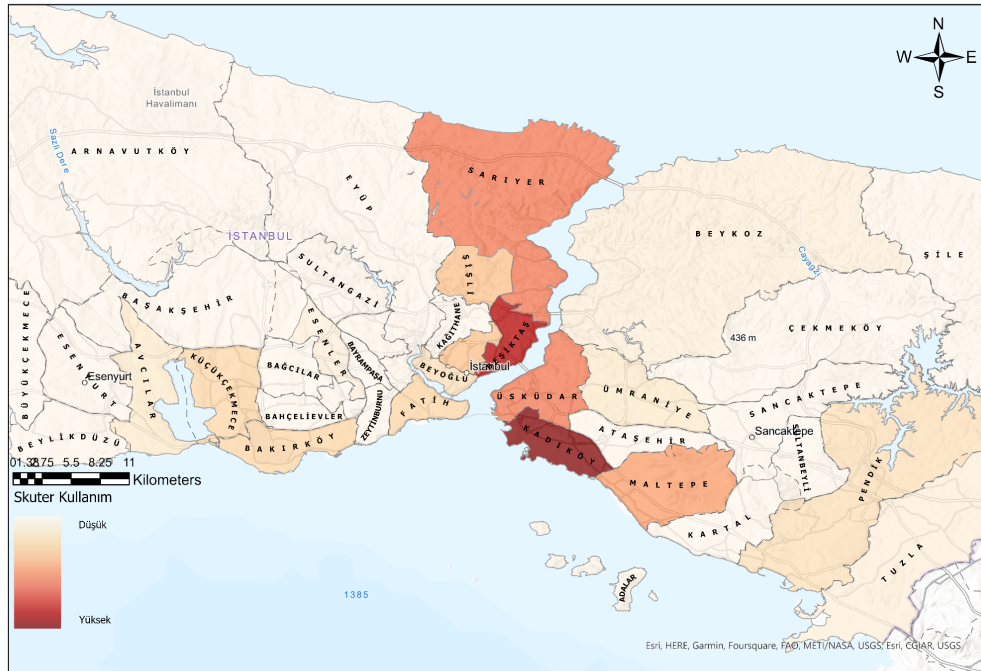
- n: Örneklem sayısı
 p: Evrende incelenen bir olayın öngörülen gerçekleşme oranı
 q: Evrende incelenen bir olayın öngörülen gerçekleşmeme oranı
 z: Seçilen anlamlılık düzeyinde z değeri
 e: Hata Payı

Literatürde, paylaşımlı e-skuter kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda örneklem seçiminde farklı tekniklerin kullanıldığı görülmüştür. Bu tekniklerden biri de kartopu örnekleme tekniğidir [21], [28]-[30]. Bu tekniğin kullanıldığı çalışmalarda katılımcıların ankete dahil edilmesi için yaş [28], bölge [21], [28], meslek [30] vb. kısıtlar yer alabilmektedir. Bunlar dikkate alındığında sanal ortamda hazırlanan çevrimiçi anket, İstanbul ilinde yaşayan ve 18 yaş üzeri kişilere kartopu örnekleme tekniği kullanılarak yine sanal ortamda (özellikle sosyal medya üzerinden) dağıtılmıştır.

Ankete katılan e-skuter kullanan veya kullanmayan kişilerin, yaşadıkları ilçelere göre oransal dağılımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Analizler sonucunda geliştirilen haritalar ArcGIS Pro 3.0 [31] programından elde edilmiştir. Şekil 1'de kullanılan iki değişkenli renkler (Bivariate Colors) analizi, yaşanan ilçe bazlı olarak e-skuter kullanan oranını tek harita üzerinde 3x3 matris ile gruplamaktadır. Bu, diğer analiz tekniklerinden farklı olarak verilerin daha etkili bir şekilde sunulmasını sağlamaktadır. Öyle ki üçlü renk skalası ile ikamet edilen ilçelerde e-skuter kullanan ve kullanmayanların toplam anket sayısına göre göreceli oranları saptanabilmektedir. Örneklem dağılımından anlaşılacağı gibi, yapılan anketler tüm İstanbul şehrini kapsasa da özellikle sahil kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Şehrin iç kesimlerinde yer alan ilçelerde e-skuter kullanmayanların oranının daha yüksek olduğu görülmektedir.



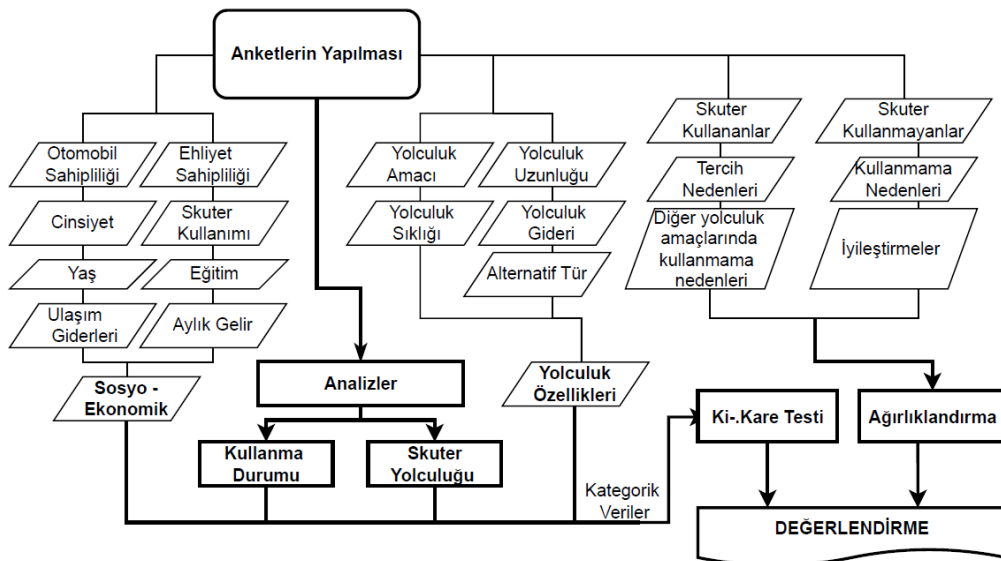
Paylaşımlı e-skuter kullanılan ilçe bilgileri incelendiğinde, verilerin yaklaşık %70'inin Kadıköy, Beşiktaş, Sarıyer, Üsküdar ve Maltepe ilçelerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 2). Diğer taraftan; Bakırköy, Beyoğlu gibi ilçelerde yaşayan katılımcılarda e-skuter kullananların oranı yüksek olmasına karşın bu ilçeler içindeki e-skuter kullanımının orta düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kişilerin e-skuteri yaşadıkları ilçeler dışında da kullandığını göstermektedir.



Şekil 2. E-skuter kullanılan ilçelerin oransal dağılımı (Proportional distribution of districts where shared e-scooters are used)

2.3. Akış diyagramı (Flow chart)

Çalışma kapsamında yapılan anketlerden elde edilen veriler üç sınıfta toplanmıştır. Bunlar; kişilerin sosyo-ekonomik durumlarına, e-skuter kullananların yolculukları ile ilgili bilgilerine ve e-skuter kullanma durumuna göre tercih ya da önerilerine ait verilerdir. Bu veriler ve analiz süreci daha ayrıntılı olarak akış diyagramı üzerinden gösterilmiştir (Şekil 3). Buna göre, kişilerin sosyo-ekonomik yapılarının kullanma durumuyla ve paylaşımlı e-skuter yolculuk özelliklerinin birbirleriyle ilişkileri test edilmiştir. Bu ilişkilerin anlamlılığının test edilmesi, verilerin birbiri arasındaki bağlantının açıklanabilir olma durumunu göstermektedir. Bu doğrultuda, analizlerde ki-kare testi kullanılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Diğer yandan yolculuk amacı, e-skuter kullanan ve kullanmayanlara tercih nedenleri ve iyileştirmeler ile ilgili çoklu seçenek-çoklu seçim türünde sorular sorulmuştur. Yani katılımcılar birden çok seçeneği seçebilmektedir. Bu doğrultuda, kişilerin ağırlıklarının eşit olduğu varsayılmış ve belirlediği seçenek sayısına göre seçenek ağırlıkları saptanmıştır. Özetle, elde edilen veriler akış diyagramının ilgili aşamalarında hem anlamlılık hem de ağırlıklandırma üzerinden yorumlanarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Akış Diyagramı (Flow chart)

2.4. Kullanılan yöntemler (Methodology)

Çalışma kapsamında veri setinin analizi sürecinde iki tür yöntem kullanılmış ve bunlar detaylıca açıklanmıştır.

2.4.1. Ki-kare testi (Chi square test)

Nitel iki değişken arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki olup olmadığı ki-kare testi ile incelenebilmektedir [32]. Literatürde paylaşımlı e-skuter kullanımının incelendiği çalışmalarda da ki-kare testinden faydalanılmıştır [33]-[35]. Bu doğrultuda, çalışmada ankete katılanların cinsiyet, yaş, eğitim düzeyi, ehliyet durumu, otomobil sahipliği, aylık gelir ve aylık ulaşım gideri gibi kategorik olarak düzenlenen sosyo-ekonomik özellikleri ile paylaşımlı e-skuter kullanım durumları arasındaki ilişkiyi belirlemek için yöntem olarak ki-kare testi kullanılmıştır. Bu kapsamda veriler IBM SPSS Statistics 20.0 paket programı [36] kullanılarak analiz edilmiştir. Gözlenen değerler ile beklenen değerler arasındaki farkı araştıran ki-kare testi, farklılığı anlamlı bulduğunda iki kategorik değişken arasında anlamlı bir ilişki olduğunu ve bağımsız kategorik değişkenin bağımlı kategorik değişken üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Ki-kare testine ait formül Denklem 2'de verilmiştir [37].

$$X_{hes}^2 = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^r \frac{(G_{ij} - B_{ij})^2}{B_{ij}} \quad (2)$$

c, r: satır, sütun sayıları

G_{ij} : gözlenen değer

B_{ij} : beklenen değer

X_{hes}^2 : Hesaplanan ki-kare değeri

Çalışmada sosyo-ekonomik özellikler ve e-skuter kullanım durumu arasındaki ilişki %5 ve %10 anlamlılık düzeylerinde ki-kare testi yöntemi ile araştırılmıştır. Sonrasında, paylaşımlı e-skuter kullanıcılarına ait yolculuk özellikleri (yolculuk amacı, yolculuk mesafesi, kullanım sıklığı, ort. aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü) arasındaki ilişkilerin durumu benzer şekilde %5 ve %10 anlamlılık düzeylerinde ki-kare testi yöntemi ile irdelenmiştir. Buna göre:

- İki seçeneğe sahip iki yolculuk özelliği (2 x 2 tablolarda) karşılaştırılmış ve ki-kare testi beklenen frekans değerlerinden biri 5'ten küçük ise Fisher's Exact testi [38],
- İki'den fazla seçeneğe sahip iki yolculuk özelliği (n x m tablolarda, n > 2 veya m > 2) karşılaştırılmış ve ki-kare testi beklenen frekans değerlerinin %20'sinden fazlası 5'ten küçük ise Fisher-Freeman-Halton testi [38], [39]

kullanılmıştır. Bununla birlikte çalışmada kullanım özellikleri arasındaki ilişkilerin gücünü ölçmek için Cramer's V katsayısı kullanılmıştır. n x m tablolarda iki değişken arasındaki ilişki gücünü gösteren Cramer's V katsayısı 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. 0 değeri ilişkinin olmadığını göstermekte, 1 değerine doğru ilişki artmaktadır [40].

2.4.2. Ağırlıklandırma yöntemi (Weighting method)

Paylaşımlı e-skuter kullanan katılımcıların yolculuk amaçları, tercih etme nedenleri, farklı yolculuk türlerinde neden kullanmadıkları; e-skuter kullanmayan katılımcıların ise bu türü neden tercih etmedikleri ve tercih etmelerini sağlayacak düzenlemeler irdelenmiş, böylece e-skuterin gelişimi katılımcı açısından değerlendirilmiştir. Bu aşamada katılımcılara yöneltilen sorulara cevap olarak önceden hazırlanmış seçenekler arasından bir ya da daha fazlasını seçme hakkı verilmiştir (Anket kapsamında en yüksek seçme sayısı üç olarak belirlenmiştir). Katılımcıların belirlediği seçeneklerin ağırlıkları ile ilgili yeterli bilgiye sahip olunmadığından ağırlık değerleri Denklem 3'te tanımlanan eşit ağırlıklar yöntemi (normalleştirilmiş ağırlık) kullanılarak belirlenmiştir [41], [42].

$$w_{k(i)} = 1/s_i \quad (3)$$

$w_{k(i)}$: i' inci sıradaki katılımcı için k. sıradaki seçeneğinin normalleştirilmiş ağırlık değeri

s_i : i' inci sıradaki katılımcının belirlediği seçeneklerin sayısı

Sonrasında, tüm katılımcılardan elde edilen ağırlıkların seçenek bazlı olarak aritmetik ortalaması alınmıştır (Denklem 4). Normalleştirilmiş ağırlıklar kullanılarak yapılan ortalama hesaplaması tüm seçenekler içinde baz alınan seçeneğin yüzdesel ağırlığını da vermektedir. Böylece, kullanılan yöntem ile ankete katılan her bireyin eşit derecede sonuca etki etmesi sağlanmıştır.

$$w_{k(\%)} = \bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{k(i)} \quad (4)$$

$w_{k(\%)}$: tüm seçenekler içinde k. seçeneğin yüzdesel ağırlığı

\bar{x}_k : k. sıradaki seçeneğinin normalleştirilmiş ağırlık değerinin aritmetik ortalaması

$w_{k(i)}$: i' inci sıradaki katılımcı için k. sıradaki seçeneğinin normalleştirilmiş ağırlık değeri

n = toplam katılımcı sayısı (Araştırma yapılan gruba ait)

3. Bulgular (Findings)

Mikromobilitate araçlarından paylaşımlı e-skuter kullanımının irdelenmesinde, akış diyagramına uygun olarak incelemeler yapılmıştır.

3.1. Paylaşımlı e-skuter kullanım durumu ile kişi özellikleri arasındaki ilişkiler (Relationships between usage of shared e-scooter and characteristics of participants)

Analizlerde Ocak ile Mart 2021 tarihleri arasında çevrimiçi ortamda yapılan anket verileri kullanılmıştır. Veri seti İstanbul ilinde yaşayan 314 katılımcıya aittir. Analiz sürecinde paylaşımlı e-skuter kullanım durumunun irdelenebilmesi için paylaşımlı e-skuter kullananlar ve kullanmayanlar iki gruba ayrılmıştır. Bu ayrıma göre ankete katılanlara ait tanımlayıcı istatistik verileri Tablo 2'de verilmiştir. Anket yapılan kişilerin %33'ünün paylaşımlı e-skuteri daha önce kullandığı, %67'sinin ise hiç kullanmadığı belirlenmiştir.

Tablo 2. Tüm katılımcılara ait tanımlayıcı istatistikler (Descriptive statistics for all participants)

Gruplar		Paylaşımlı e-skuter Kullananlar		Paylaşımlı e-skuter Kullanmayanlar		Toplam Katılımcı	
		Sayı	%	Sayı	%	Sayı	%
Kullanma Durumu		104		210		314	
Cinsiyet	Erkek	70	38	114	62	184	59
	Kadın	34	26	96	74	130	41
Yaş	20-25	37	43	50	57	87	28
	26-30	38	33	76	67	114	36
	30-35	19	27	51	73	70	22
	35+	10	23	33	77	43	14
Eğitim Düzeyi	Lise ve Öncesi	14	23	46	77	60	19
	Lisans	65	38	104	62	169	54
	Lisansüstü	25	29	60	71	85	27
Ehliyet Durumu	Ehliyeti yok	14	25	42	75	56	18
	Ehliyet var*	90	35	168	65	258	82
Otomobil Sahipliği	Evet	42	32	88	68	130	41
	Hayır	62	34	122	66	184	59
	1000 altı	13	32	28	68	41	13
	1000-2500	11	46	13	54	24	8
	2500-4000	16	29	40	71	56	18
Aylık Gelir (TL)	4000-5500	25	40	38	60	63	20
	5500-7000	15	25	46	75	61	19
	7000-8500	8	38	13	62	21	7
	8500+	16	33	32	67	48	15
	0-100	29	25	87	75	116	37
Aylık Ulaşım Gideri (TL)	101-250	18	35	34	65	52	17
	251-500	32	35	59	65	91	29
	500+	25	45	30	55	55	17

* A ve B sınıf ehliyetlerden en az birine sahip katılımcılardır.

Paylaşımli e-skuter kullanım durumu ile kişi özellikleri arasındaki ilişkilerin irdelenmesinde ki-kare testi kullanılmış ve analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Katılımcıların tanımlayıcı istatistik verileri ve ki-kare sonuçlarına göre:

- Paylaşımli e-skuter kullanım oranı erkeklerde %38, kadınlarda %26 olarak belirlenmiştir. Paylaşımli e-skuter kullanım durumunun %5 anlamlılık düzeyinde cinsiyet ile ilişkili olduğu ($p<0,05$) ve paylaşımli e-skuter kullanımının erkeklerde daha yüksek olduğu görölmektedir. Yapılan bir çalışma da aynı anlamlılık düzeyinde ($p<0,05$) e-skuter kullanımı ile cinsiyetin ilişkili olduğu sonucunu destekler niteliktedir [21].
- Paylaşımli e-skuter kullanımının 20-25 yaş aralığındaki kişilerde en yüksek oranda (%43) olduğu görölmektedir. Paylaşımli e-skuter kullanım durumunun %10 anlamlılık düzeyinde yaş ile ilişkili olduğu ($p<0,10$) belirlenmiştir. Buna göre, yaş yükseldikçe paylaşımli e-skuter kullanımının azaldığı görölmektedir. Yakın sonuçlar; 2019 yılında Fransa'nın Paris kentinde yapılan bir anket çalışmasından da elde edilmiş ve çalışmada, kullanıcıların çoğunluğunun 18-29 yaş arası erkekler olduğu sonucuna ulaşılmıştır [9].
- Paylaşımli e-skuter kullanım oranı lisans mezunlarında %38 ile en yüksektir, bunu %29 ile lisansüstü ve %23 ile lise ve öncesi eğitim düzeyleri izlemektedir. Paylaşımli e-skuter kullanım durumu ile %10 anlamlılık düzeyinde mezun olunan eğitim seviyesi arasında ilişki olduğu görölmektedir ($p<0,10$). Eğitim seviyesi yüksek olanlarda özellikle lisans mezunlarında, paylaşımli e-skuter kullanımı daha yüksektir. 2019 yılında Yeni Zelanda'da yapılan çalışmada [11], 2020 yılında Avusturya'da yapılan çalışmada [12] ve 2020 yılında İspanya'da yapılan bir diğer çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmış olup [13], eğitim seviyesi yüksek bireylerin paylaşımli e-skuter kullanım oranlarının yüksek olduğu görölmüştür. Yapılan benzer bir çalışmada da eğitim düzeyi ile kullanım oranı arasındaki ilişkinin anlamlı olduğu görölmüştür[23].
- Paylaşımli e-skuter kullanımında en yüksek oranın (%45) aylık ulaşım gideri 500 TL ve üzeri kişilerde olduğu saptanmıştır. Paylaşımli e-skuter kullanımı ile aylık ulaşım gideri arasında %10 anlamlılık düzeyinde ilişki olduğu belirlenmiştir ($p<0,10$). Buna göre, aylık ulaşım gideri yükseldikçe paylaşımli e-skuter kullanımının da arttığı görölmektedir.
- Paylaşımli e-skuter kullanımının ehliyete sahip olanlarda daha yüksek olduğu (%35) görölmektedir. Ancak, ki-kare testi sonucunda paylaşımli e-skuter kullanımı ile ehliyet sahipliği arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir.
- Paylaşımli e-skuter kullanım oranının otomobil sahipliğine göre oransal olarak küçük mertebelerde değiştiği gözlemlenmiştir (%32 ve %34). Benzer şekilde, ki-kare testi sonucunda paylaşımli e-skuter kullanımı ile otomobil sahipliği arasında anlamlı bir ilişki saptanmamıştır.
- Paylaşımli e-skuter kullanım durumu ile kişilerin aylık geliri arasında doğrusal bir ilişki görölmemiştir. Benzer şekilde, ki-kare testi sonucunda paylaşımli e-skuter kullanımı ile aylık gelir arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Bu durum, paylaşımli e-skuter kullanımında gelirin öneminin olmadığı ve bu türe her kesimin erişebildiği sonucunu ortaya koymaktadır. Yeni Zelanda'da yapılan benzer bir çalışmada yüksek geliri kişilerin e-skuter kullanma oranının daha yüksek olduğu sonucu çıkmasına karşın [11] İspanya'da yapılan başka bir çalışmada ise gelir seviyesi yüksek kişilerin e-skuter kullanım oranının düşük olduğu görölmüştür [13]. Literatürdeki iki çalışmanın aksine bu çalışmada gelir seviyesinin e-skuter kullanımı üzerinde belirgin bir rol oynamadığı düşünölmektedir.

Tablo 3. Kişi özellikleri ile e-skuter kullanım durumu arasındaki ilişkiler (Relationships between person characteristics and usage of shared e-scooter)

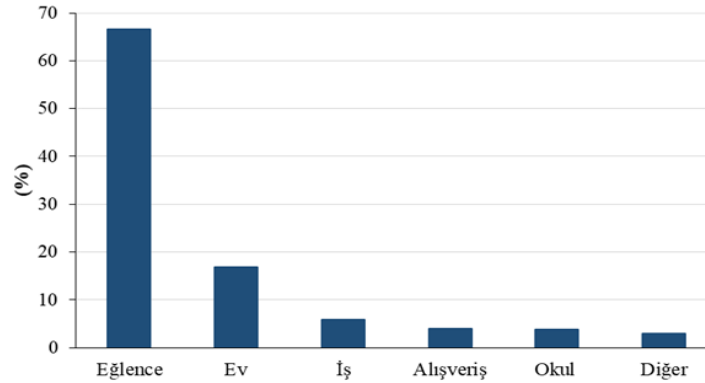
Kişi Özellikleri	Serbestlik Derecesi (sd)	χ^2	p
Cinsiyet	1	4,862	0,027*
Yaş	3	6,497	0,090**
Eğitim Düzeyi	2	5,299	0,071**
Ehliyet Durumu	1	2,029	0,154
Otomobil Sahipliği	1	0,066	0,797
Aylık Gelir (TL)	6	5,775	0,449
Aylık Ulaşım Gideri (TL)	3	7,455	0,059**

* %5 anlamlılık düzeyi

** %10 anlamlılık düzeyi

3.2. Paylaşımlı e-skuter kullanım özelliklerinin birbiriyle ilişkileri (Relationships between shared e-scooter usage features)

Kullanım özellikleri arasındaki ilişki incelenmeden önce, paylaşımlı e-skuter kullanıcılarının yolculuk amaçları irdelenmiştir. İncelemedeki amaç hem veri setinin yolculuk amacına yönelik dağılımını görmek hem de bu türün mevcut durumda kent içi ulaşımdaki yerini değerlendirmektir. Buna göre, paylaşımlı e-skuteri kullananların öncelikli yolculuk amacında ilk sırada (ağırlıklandırılmış sonuçlara göre) %67 oranla eğlence amaçlı yolculuklar yer almaktadır (Şekil 4). Bu durum paylaşımlı e-skuterin henüz ana ulaşım aracı olarak algılanmadığını da göstermektedir.



Şekil 4. Paylaşımlı e-skuterin yolculuk amacına göre kullanım oranları (Shared e-scooter usage rates by trip purpose)

Yolculuk amacı açısından diğer bir değerlendirmede, bir kişinin yaptığı yolculuk temelde iki gruba ayrılmış ve bu doğrultuda katılımcılara yolculuk amacına göre ayrı sorular yöneltilmiştir. Bu yolculuk grupları zorunlu yolculuklar ve zorunlu olmayan yolculuklardır. Zorunlu yolculuklar evden işe/okula ya da işten/okuldan eve yapılan yolculuklardır. Zorunlu olmayan yolculuklar ise ziyaret, eğlence, alışveriş amaçlı yapılan yolculuklardır. Bazı katılımcılar paylaşımlı e-skuterleri sadece zorunlu ya da zorunlu olmayan yolculuklarda tercih ederken, bazı katılımcılar ise her iki yolculuk türünde de paylaşımlı e-skuterleri tercih edebilmektedir. Bu doğrultuda, paylaşımlı e-skuter kullanımına ait tanımlayıcı istatistik verileri Tablo 4'te özetlenmiştir. Analizde kullanılan veriler, 104 paylaşımlı e-skuter kullanıcılarından alınan 144 adet kullanım özelliği verisine aittir. Burada bazı katılımcılar hem zorunlu hem de zorunlu olmayan yolculukları ile ilgili kullanım bilgileri vermişlerdir.

Kullanım özellikleri dışında veri setinden elde edilen diğer çıktılar, paylaşımlı e-skuter kullananların %7'sinin kendisine ait e-skuteri bulunduğu; %9'unun paylaşımlı e-skuteri sadece üniversite kampüslerinde kullandığıdır. Paylaşımlı e-skuter markaları ülkemizde genellikle yeni girişim firmaları olduğu için özellikle üniversite kampüslerinde ortaya çıkıp daha sonra şehirlere yayılmaktadır. Buna karşın üniversitelere giriş ve çıkışlar tüm kullanıcılar için kısıtlı olduğundan paylaşımlı e-skuterlerin daha çok şehir merkezlerinde kullanıldığı görülmektedir. ABD'nin Austin kentinde yapılan çalışmada kullanıcıların yalnızca %10'unun üniversite kampüsünde toplanması bu düşüncüyü destekler niteliktedir [7].

Tablo 4. Paylaşımlı e-skuter kullanım özelliklerine ait tanımlayıcı istatistikler (Descriptive statistics for shared e-scooter usage features)

Özellikler	Gruplar	Sayı	%
Yolculuk Amacı	Zorunlu yolculuk	57	40
	Zorunlu olmayan yolculuk	87	60
	500 m altı	26	18
Tercih Edilen Yolculuk Mesafesi	500 m - 1 km	49	34
	1 km - 3 km	48	33
Kullanım Sıklığı	3 km ve üzeri	21	15
	Ayda ortalama 1 defa ve daha az	81	56
	Ayda ortalama 2 defa	39	27
	Haftada ortalama 1-3 defa	9	6
Ort. Aylık Skuter Ulaşım Gideri (TL)	Haftada ortalama 5 ve üzeri	15	11
	25 ve altı	68	47
	26-50	52	36
Tercih Edilen İkinci Ulaşım Türü	50+	24	17
	Yürüme	72	50
	Bisiklet	4	3
Tercih Edilen İkinci Ulaşım Türü	Taksi	31	21
	Toplu Taşıma	37	26

Paylaşımlı e-skuter kullanımına ait tanımlayıcı istatistik verilerine göre:

- Paylaşımlı e-skuter kullananların %60'ının bu türü zorunlu olmayan yolculuklarda tercih ettiği görülmüştür. Buna göre paylaşımlı e-skuterin zorunlu olmayan yolculuklarda daha çok tercih edildiği söylenebilmektedir. Bu sonuç; ABD, Fransa ve Almanya'da yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir [8], [9], [43].
- Paylaşımlı e-skuter kullananların tercih ettiği yolculuk mesafesi %67 oranla 500-3000 m arasında yoğunlaşmaktadır. Bu durum e-skuterin kent merkezlerinde nispeten kısa mesafeli olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu sonuç, başka bir çalışmada elde edilen 1,2 km ortalama yolculuk mesafesi gibi net bir değer vermese de tercih edilen yolculuk mesafesinin benzer bir aralıkta olduğunu desteklemektedir [7].
- Paylaşımlı e-skuter kullananların %83'ünün kullanım sıklığının ayda 2 ve daha az olduğu görülmektedir.
- Paylaşımlı e-skuter kullananların ort. aylık skuter ulaşım gideri genellikle 0-50 TL arasında değişmektedir (%83).
- Paylaşımlı e-skuter kullananların bu türe ulaşamadıklarında tercih edeceği ikinci ulaşım türü %50 ile yürüme, %21 ile taksi, %26 ile toplu taşıma ve %3 ile bisiklettir. ABD'de yapılan bir çalışmada da "E-skutere ulaşma imkanınız yoksa hangisini tercih ederiniz?" sorusuna kullanıcıların %57'si yürüme, %25'i otomobil ve %8'i bisiklet şeklinde cevap vermişlerdir [8]. Fransa'da yapılan bir çalışma ile paylaşımlı e-skuter kullanıcılarının nadiren 3-4 dakikayı aşan yürüme yaptıkları sonucuna varılmıştır [9]. Bununla birlikte paylaşımlı e-skuterin yürüme ve diğer ulaşım türleri üzerine etkileri de anket sonuçları ile benzerlikler ortaya koymaktadır [9], [12], [44]. Yürüme seçeneğinin daha az seçilmesinin yürüme alışkanlığını azaltabileceği ve sağlık açısından olumsuz sonuçlar yaratabileceği üzerine de mutlaka değerlendirme yapılmalıdır.

Paylaşımlı e-skuter kullanım özellikleri arasındaki ilişkilerin irdelenmesinde ki-kare testi kullanılmış ve analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Ki-kare testi sonuçlarına göre; yolculuk amacı ile diğer kullanım özellikleri arasında anlamlı bir ilişki belirlenmemiş, yolculuk mesafesi, kullanım sıklığı, ort. aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü parametrelerinin birbiriyle %5 ya da %10 anlamlılık düzeylerinde ilişkili olduğu görülmüştür ($p < 0,05$ ya da $p < 0,10$).

Tablo 5. Paylaşımlı e-skuter kullanım özellikleri arasındaki ilişkiler (Relationships between shared e-scooter usage features)

Özellikler	Yolculuk Amacı	Yolculuk Mesafesi	Kullanım Sıklığı	Ort. Aylık Skuter Ulaşım Gideri	Tercih Edilen İkinci Ulaşım Türü
Yolculuk Amacı	-	0,787	0,233	0,105	0,587
Yolculuk Mesafesi	0,787	-	0,005*	0,075**	0,150
Kullanım Sıklığı	0,233	0,005*	-	0,000*	0,067**
Ort. Aylık Skuter Ulaşım Gideri	0,105	0,075**	0,000*	-	0,011*
Tercih Edilen İkinci Ulaşım Türü	0,587	0,150	0,067**	0,011*	-

* %5 anlamlılık düzeyi

** %10 anlamlılık düzeyi

Kullanıcılardan elde edilen verilerden birisi olan yolculuk amacı değişkeni ile diğer tüm değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Bundan dolayı detaylı incelemede yolculuk amacı değişkeninden söz edilmemiştir. Paylaşımlı e-skuterin yolculuk amacı verisinde özellikle zorunlu olmayan yolculuklarda kullanım oranının yüksek olması, yolculuk amacının diğer değişkenler ile anlamlı ilişkisinin bulunmama nedenlerindedir. Yolculuk mesafesi, kullanım sıklığı ve ort. aylık skuter ulaşım gideri değişkenleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, ilişkinin doğrusal bir yapıda olduğu ve değişkenlerden biri yükseldiğinde diğerinin de yükseldiği görülmektedir. Anlamlı ilişkiye sahip bu değişkenlere detaylıca bakıldığında:

- Yolculuk mesafesi ve kullanım sıklığının istatistiksel olarak %5 anlamlılık düzeyinde ilişkili olduğu ($p < 0,05$) ve ilişki düzeyinin de düşük seviyede olduğu belirlenmiştir (Cramer's V değeri=0,22).
- Yolculuk mesafesi ve ort. aylık skuter ulaşım gideri arasında istatistiksel olarak %10 anlamlılık düzeyinde ilişki olduğu ($p < 0,10$) ve ilişki düzeyinin de düşük seviyede olduğu saptanmıştır (Cramer's V değeri=0,20).
- Kullanım sıklığı ve ort. aylık skuter ulaşım gideri arasında istatistiksel olarak %5 anlamlılık düzeyinde ilişki olduğu ($p < 0,05$) ve ilişki düzeyinin de orta seviyede olduğu hesaplanmıştır (Cramer's V değeri=0,50).

Kullanım sıklığı ve ort. aylık skuter ulaşım giderinin tercih edilen ikinci ulaşım türü ile ilişkisi değerlendirildiğinde:

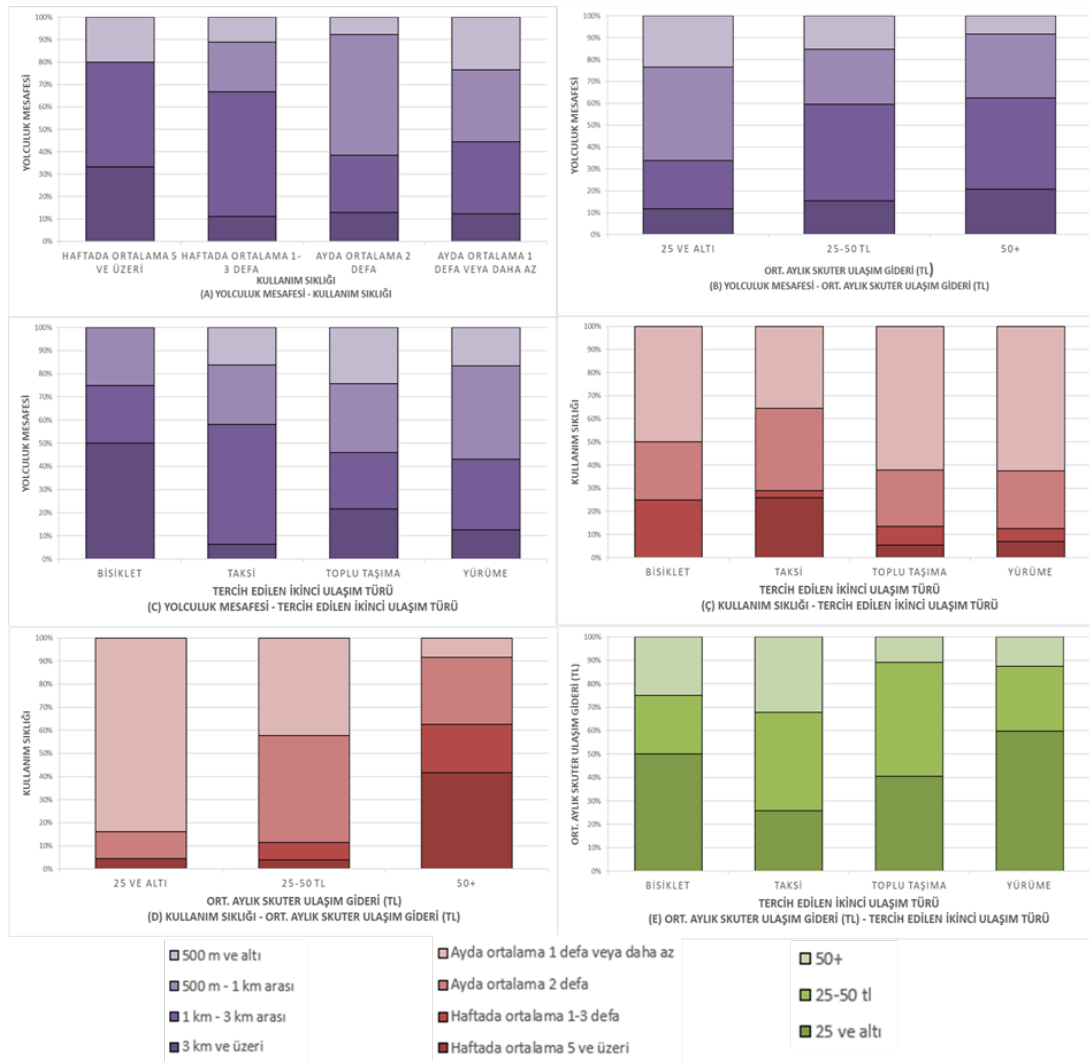
- Kullanım sıklığı ve tercih edilen ikinci ulaşım türü arasında istatistiksel olarak %10 anlamlılık düzeyinde ilişki olduğu ($p < 0,10$) ve ilişki düzeyinin de düşük seviyede olduğu belirlenmiştir (Cramer's V değeri=0,19).
- Ort. aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü arasında istatistiksel olarak %5 anlamlılık düzeyinde ilişki olduğu ($p < 0,05$) ve ilişki düzeyinin de düşük seviyede olduğu hesaplanmıştır (Cramer's V değeri=0,23).

Şekil 5'te verilen grafikler ile ilgili açıklamalar ve yorumlar maddeler halinde verilmiştir. Buna göre:

- *Yolculuk mesafesi ve kullanım sıklığı (A)*: Daha sık skuter kullanan kişilerin diğer kişilere göre daha uzun mesafelerde bu türü kullandığı, en az skuter kullanan kişilerin ise diğer mesafelere göre en kısa mesafede bu türü daha fazla kullandıkları görülmüştür. Bu iki sonuç birbirini destekler niteliktedir.
- *Yolculuk mesafesi ve ort. aylık skuter ulaşım gideri (B)*: E-skuter kullanım mesafesi arttıkça yolculuklara ödenen aylık ücretlerin de arttığı görülmüştür. Bu durum mesafe ve fiyat ilişkisi açısından beklenen bir sonuçtur.
- *Yolculuk mesafesi ve tercih edilen ikinci ulaşım türü (C)*: Çalışma kapsamında bu iki değişken arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Bu anlamda e-skutere erişilemediği durumlarda kullanıcıların ikinci

tür tercihlerinde yolculuk mesafelerinin bir önemi olmadığı görülmektedir. Yani kullanıcıların yolculuk mesafelerinin artması veya azalması tercih ettikleri ikinci ulaşım türünü etkilememektedir. Bu durum, skuter kullanım mesafelerinin diğer ulaşım türlerine göre (taksi ve toplu taşıma) nispeten kısa olması ile açıklanabilir.

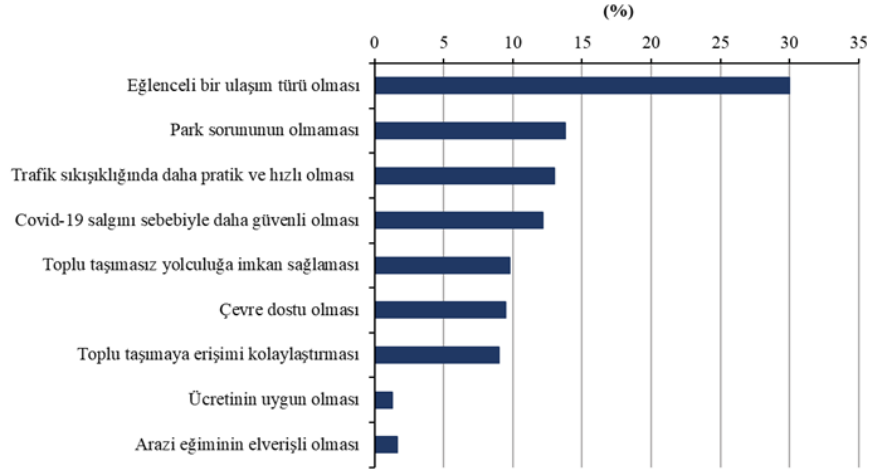
- *Kullanım sıklığı ve tercih edilen ikinci ulaşım türü (Ç):* E-skuter kullanım sıklığı fazla olan kişilerin, e-skutere ulaşamadıklarında öncelikli olarak tercih ettikleri ulaşım türünün oransal olarak taksiler olduğu görülmektedir. E-skuter kullanım sıklığı daha az olan kişilerin ise ikinci tercihlerinin oransal olarak yürüme ve toplu taşıma olduğu belirlenmiştir.
- *Kullanım sıklığı ve ort. aylık skuter ulaşım gideri (D):* Kişilerin e-skuter kullanım sıklığı arttıkça oransal olarak ort. aylık skutere harcanan giderlerinin de arttığı görülmüştür. Bu durum sık kullanım ve ödenen fiyat ilişkisi açısından beklenen bir sonuçtur.
- *Ort. aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü (E):* Ort. aylık skuter gideri daha az olan kişilerin, e-skutere ulaşamadıklarında oransal olarak seçtikleri alternatif ikinci türün yürüme olduğu görülmüştür. Ort. aylık skuter gideri daha fazla olan kişilerin ise e-skutere ulaşamadıklarında oransal olarak seçtikleri ikinci türün taksi olduğu belirlenmiştir.
- Genel olarak bakıldığında, paylaşımlı e-skuteri daha kısa mesafelerde, daha az kullanım sıklığında tercih eden ve ort. e-skuter ulaşım gideri az olan kullanıcıların ikinci ulaşım türü olarak yürüme ve toplu taşımaya eğilimlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5. Paylaşımlı e-skuter kullanım özelliklerine ait grafikler (Graphs of shared e-scooter usage features)

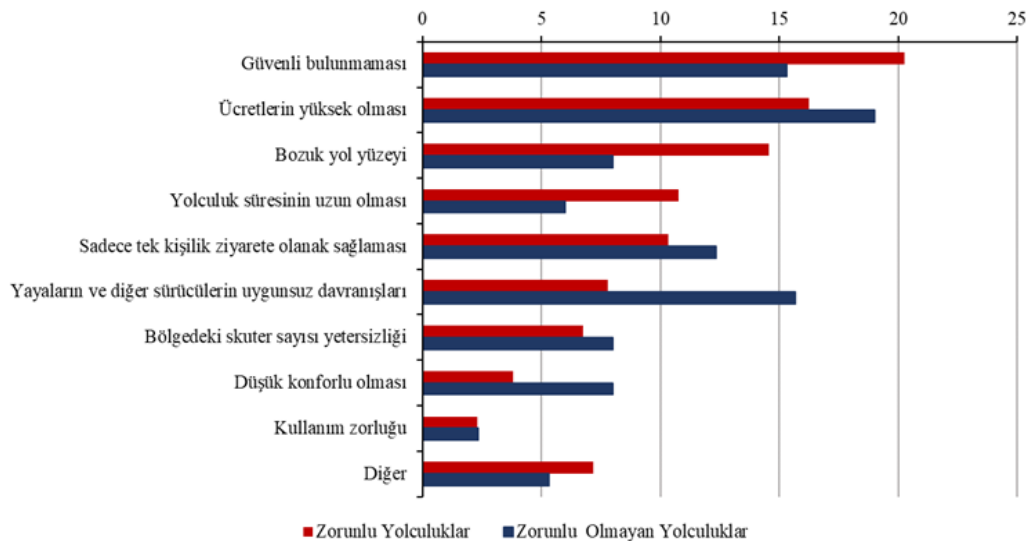
3.3. Paylaşımlı e-skuterin katılımcılar açısından durumu (Situation of shared e-scooter for participants)

Paylaşımlı e-skuteri kullanan katılımcılara bu türü tercih etme nedenleri sorulmuş ve eğlenceli bir ulaşım türü olması (ağırlıklandırılmış sonuçlara göre) ilk neden olarak belirlenmiştir. Ayrıca seçim nedenleri arasında yer alan 'Covid-19 salgını nedeniyle daha güvenli olması' cevabı salgınların bu türe olan ilgiyi daha da artırabileceğini göstermektedir. Paylaşımlı e-skuter için sıralanmış tercih edilme nedenleri Şekil 6'da verilmiştir.



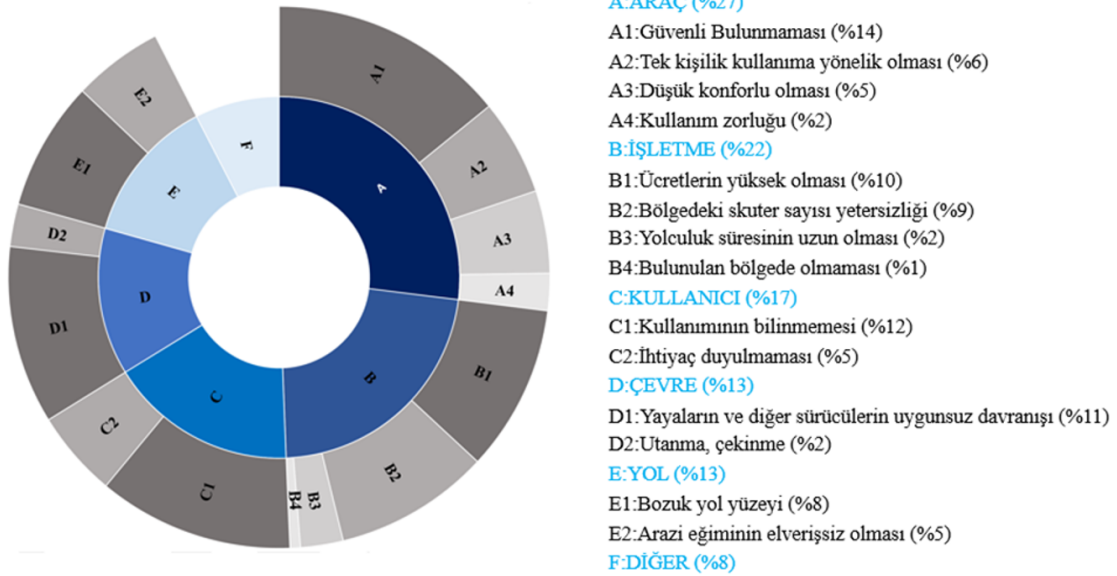
Şekil 6. Paylaşımlı e-skuter kullananların tercih nedenleri (Reasons for preference of shared e-scooter users)

Paylaşımlı e-skuteri zorunlu ya da zorunlu olmayan yolculuklarda kullanmayanların nedenleri belirlenerek yolculuk amacına göre kullanım sıklığını artırabilecek etkenler irdelenmiştir. Paylaşımlı e-skuteri hiç kullanmayanlara da bu türü tercih etmeme nedenleri ve hangi iyileştirmeler ile tercih edebilecekleri sorularak kullanıcı sayısının artmasındaki engeller saptanmıştır. Bu doğrultuda, paylaşımlı e-skuter kullanıcılarına, yolculuk türüne göre tercihini olumsuz etkileyen nedenler sorulmuştur. Ağırlıklandırılmış sonuçlara göre, zorunlu yolculuklarda bu türü kullanmama nedenlerinin ilk üçünde güvenli bulunmaması, ücretlerin yüksek olması ve bozuk yol yüzeyi yer almaktadır. Zorunlu olmayan yolculuklarda ise paylaşımlı e-skuter kullanmama nedenlerinin ilk üçünde ücretlerin yüksek olması, yayaların ve diğer sürücülerin uygunsuz davranışları ve güvenli bulunmaması yer almaktadır (Şekil 7). Buna göre paylaşımlı e-skuter ücretlerinin yüksek olmasının her iki yolculuk türünde de olumsuz bir neden olduğu görülmekte, bu konuda yapılacak düzenlemelerin paylaşımlı e-skuter kullanımını etkileyeceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, katılımcıların gelirleri ve kullanım durumları arasında anlamlı bir ilişki bulunmasa da paylaşımlı e-skuter kullanmayanların ücretleri fazla bulması irdelenmesi gereken önemli bir bulgudur.



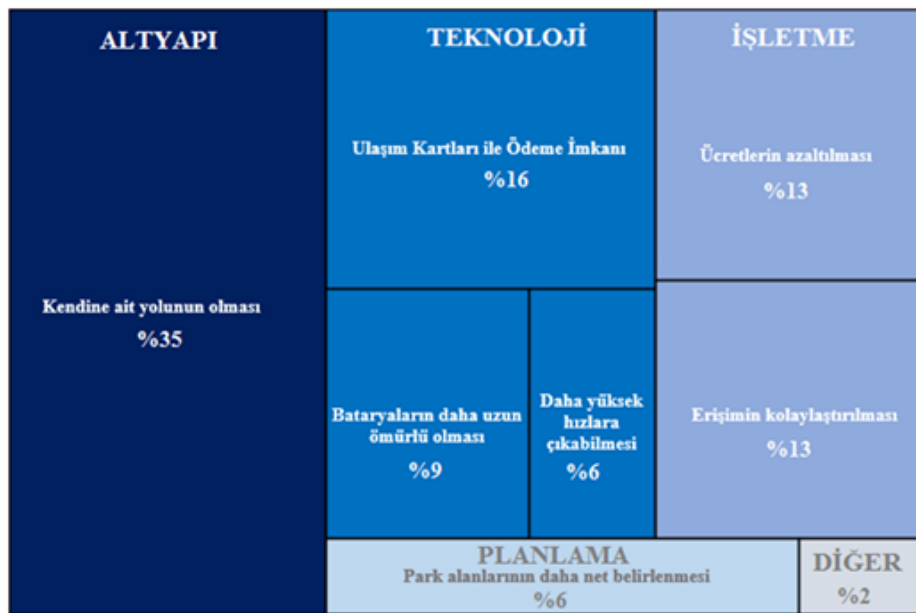
Şekil 7. Paylaşımlı e-skuter kullanmama nedenleri (Reasons for not using shared e-scooter)

Paylaşımlı e-skuter aracını hiç kullanmayanlara bu türü tercih etmeme nedenleri sorulmuştur. Ağırlıklandırılmış sonuçlara göre; ilk nedenin skuterin güvenli bulunmaması olduğu görülmüştür. Bu yanıt skuter kullanımının bilinmemesi seçeneği takip etmiştir. Bununla birlikte verilen cevaplar araç, işletme, kullanıcı, çevre, yol ve diğer olmak üzere altı kategori altında toplanmıştır. Bu durumda tercih etmeme nedenlerini oluşturan cevapların %27'sinin araç kaynaklı olduğu görülmüştür (Şekil 8). ABD'nin Arizona eyaletinde yapılan benzer bir çalışmada paylaşımlı e-skuter kullanmayan kişilere tercih etmeme nedenleri sorulmuştur. Katılımcılardan bu türün cazip bulunmaması, kaza yapma olasılığının fazla olması, kontrolü kaybetme korkusu, sabit olmaması sebebiyle düşmekten korkulması gibi çoğunluğu araç kaynaklı nedenlerden oluşan cevaplar alınmıştır [8]. Belirlenen nedenlerin iyileştirilmesinin, paylaşımlı e-skuter kullanmayan bu kesimin tercihlerinde değişikliğe yol açabileceği öngörülmektedir.



Şekil 8. Paylaşımlı e-skuteri hiç kullanmayanların tercih etmeme nedenleri (Reasons for not using shared e-scooter according to non-users)

Paylaşımlı e-skuteri hiç kullanmayanlara bu türü tercih etmeleri için nasıl iyileştirmeler istedikleri sorulmuştur. Ağırlıklandırılmış sonuçlara göre; bu soruyu yanıtlayan katılımcıların %35'i kendine ait yolunun olması cevabını vermiştir. Bununla birlikte verilen cevaplar altyapı, teknoloji, işletme, planlama ve diğer şeklinde beş kategori altında toplanmıştır. İstenilen iyileştirmelerin %66'sını teknoloji ve işletme ile ilgili değişikliklerin oluşturduğu görülmüştür (Şekil 9).



Şekil 9. Paylaşımlı e-skuteri hiç kullanmayanların istedikleri iyileştirmeler (Improvements requested by non-users)

4. Sonuç ve Değerlendirme (Results and Discussion)

Paylaşımli e-skuter sistemleri özellikle son yıllarda kent içi ulaşımda yer edinmeye başlamıştır. Türkiye'nin en yüksek nüfusuna sahip İstanbul ilinde yapılan bu çalışmada, katılımcıların sosyo-ekonomik ve paylaşımli e-skuter kullanım özellikleri incelenmiştir. Buna göre, çalışmanın literatüre katkıları şu şekildedir:

- Cinsiyet, yaş, eğitim seviyesi ve ort. aylık ulaşım gideri ile paylaşımli e-skuter kullanma durumu arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Ancak ehliyet durumu, otomobil sahipliği ve aylık gelir ile e-skuter kullanma durumu arasında istatistiksel açıdan anlamlı ilişkiler belirlenmemiştir. Literatürde cinsiyet [8]-[10], [21], yaş [7], [8], [22] ve eğitim seviyesi [11]-[13], [23] değişkenlerinde benzer sonuçların alındığı görülmüş, ancak aylık gelir değişkeni [10], [11], [13] için farklı sonuçların elde edildiği saptanmıştır.
- Paylaşımli e-skuteri tercih etme eğiliminin erkeklerde (%38), gençlerde (20-25 yaş aralığı, %43), yüksek eğitim seviyesine sahip (lisans mezunları, %38) ve ort. aylık ulaşım gideri yüksek olan kişilerde (500+ TL, %45) daha fazla olduğu belirlenmiştir. Literatürde benzer sonuçlara rastlanmış olup, erkeklerin [8]-[10], [21], gençlerin [7], [8], [22] ve yüksek eğitim seviyeli kişilerin [11]-[13], [23] e-skuter kullanma olasılığının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, gelir seviyesinin e-skuter kullanım durumu üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan birinde yüksek gelirli kişilerin e-skuter kullanma oranının daha yüksek olduğu [11], diğer bir çalışmada gelir seviyesi yüksek kişilerin e-skuter kullanım oranının düşük olduğu görülmüştür [13].
- Paylaşımli e-skuter kullanım özellikleri arasındaki ilişkiler irdelendiğinde, istatistiksel açıdan yolculuk amacı ile diğer kullanım özellikleri arasında anlamlı bir ilişki olmadığı; yolculuk mesafesi, kullanım sıklığı, ort. aylık skuter ulaşım gideri ve tercih edilen ikinci ulaşım türü parametrelerinin birbiriyle ilişkililerinin anlamlı olduğu görülmüştür.
- Paylaşımli e-skuter kullanıcılarının bu türe ulaşamadıklarında öncelikli olarak hangi ulaşım türünü tercih ettikleri araştırılmış, %50'sinin yürümeyi seçtiği saptanmıştır. Diğer tercih edilen ulaşım türlerine bakıldığında toplu taşımanın %26, taksinin ise %21 oran ile seçildiği belirlenmiştir. Bu durum paylaşımli e-skuterin kısa mesafeli toplu taşıma yolculuklarında da seçilebilirliğini göstermektedir. Bu sonuç, literatürdeki e-skuterin özel araç yolculuklarından daha çok toplu taşımayla [9], [14] ve yürüyerek [9], [12], [21] yapılan yolculukları etkilemiş olduğu çıktısı ile bağdaşmaktadır.
- Paylaşımli e-skuter kullananların tercih nedenleri araştırıldığında, sırasıyla ilk iki neden eğlenceli ulaşım türü olması ve park sorununun olmamasıdır. Buna göre paylaşımli e-skuterin zorunlu olmayan yolculuklarda (%60) daha çok tercih edildiği söylenebilmektedir. Yolculuk amacına yönelik bu sonuç literatürde yapılan çalışmaları ile benzerlik göstermektedir [8], [9], [43].
- Paylaşımli e-skuter kullanımını olumsuz etkileyen en önemli unsur bu türün güvenli bulunmamasıdır. Kiralama ücretlerinin yüksek olması ve bozuk yol yüzeyi de diğer yüksek oranlı unsurlardır. Bu sonuçlar, literatürde yer alan kaza yapma olasılığının fazla olması, kontrolü kaybetme korkusu, sabit olmama, güvenli bulmama, bozuk yol yüzeyi ve arazinin elverişsiz olması gibi endişelerle paralellik göstermektedir [8], [19].
- Paylaşımli e-skuteri hiç kullanmayan katılımcıların tercih etmeme nedenlerinde, ilk iki sırada bu türün güvenli bulunmaması (%14) ve kullanımının bilinmemesi (%12) bulunmaktadır. Bu kişilerin istedikleri iyileştirmelerin başlıcaları ise; kendine ait yolunun olması (%35) ve ulaşım kartları ile ödeme imkanı (%16) olarak belirlenmiştir. Belirlenen sorunların çözümü ve iyileştirmelerin yapılması ile paylaşımli e-skuter kullanmayan bu kesimin tercihlerinde değişiklik olması öngörülmektedir.

Çalışma sonuçlarına göre geliştirilen öneri ve düşünceler maddeler halinde verilmiştir. Buna göre:

- Paylaşımli e-skuterlerin çoğunlukla eğlence amaçlı kullanıldığı tespit edilmiştir, bu da henüz temel bir ulaşım aracı olarak kabul edilmediklerini göstermektedir. Şehir içi toplu taşıma ağı dikkate alınarak erişilebilir noktalara e-skuter kiralama istasyonları yerleştirilir ve güvenli güzergahlar oluşturulursa, e-skuterlerin kısa mesafeli aktarma yolculuklarında kullanımını artacak ve bu tür sürdürülebilir ulaşımına daha faydalı hizmet verecektir.

- E-skuterlerin bir grup katılımcı tarafından güvenli bulunmaması bu türe olan cazibeyi düşüren en önemli faktördür. Bu nedenle merkezi ve yerel yönetimlerin bölgede güvenli ve uygun altyapıya sahip güzergahları belirlemesi ve yatırımcı firmaların verimli işletme şartlarını sağlamasının e-skuterlere olan talebi yükselteceği düşünülmektedir.
- Potansiyel e-skuter kullanıcılarına yönelik güvenli sürüş eğitimi ve diğer taşıt sürücülerine farkındalık eğitimi verilmelidir. Yönetmelikte yaş sınırlaması ve koruyucu ekipman ile ilgili güvenlik tedbirleri olmasına karşın bu tedbirler kullanıcılar arasında tam olarak uygulamaya geçirilememiştir. Bu nedenle ilerleyen dönemlerde yatırımcı firmaların kullanıcılara e-skuterin yanı sıra koruyucu ekipmanları da sunması, ilgili bölgelerde de gerekli denetimlerin artırılması ve cezai yaptırımların uygulanması gerekmektedir.
- Yönetmelik, e-skuterlerin yaya yollarında sürülmesini yasaklayarak sadece bisiklet ve araç yollarında kullanılmasına izin vermiştir. Ancak, mevcut bisiklet yollarının yeterli olmadığı durumlarda kullanıcılar araç yollarında e-skuterleri sürmek zorunda kalmaktadır. Bu durum özellikle İstanbul gibi yoğun trafiğin yaşandığı şehirlerde ciddi kazalara sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle, e-skuterlerin ve diğer mikromobilité araçlarının sık kullanıldığı güzergahlarda bu araçların güvenle kullanılabilmesi kendilerine ait yolların oluşturulması önerilmektedir.
- Paylaşımli e-skuter kullanmayanların istedikleri iyileştirmeler %66 oranla teknoloji ve altyapı kaynaklı düzenlemelerdir. Bu durum, araç performans kriterleri ve altyapı imkanlarının bir grup katılımcının beklentilerini karşılamadığını göstermektedir. Teknolojik açıdan ar-ge çalışmaları kapsamında batarya ve ulaşım kartı entegrasyonunun sağlanması; altyapı açısından da e-skutere tahsisli yolun geliştirilmesi ile bu türün tercih edilmesinin artacağı öngörülmektedir.
- Tercih edilen ikinci türün ort. aylık skuter ulaşım gideri fazla olan kişilerde daha yüksek oranla taksit, ort. aylık skuter ulaşım gideri az olan kişilerde ise daha yüksek oranla yürüme olduğu görülmüştür. Buna göre, e-skuter bulamayanların ikinci tür tercih ücretleri ile e-skutere harcanan ücretlerin doğru orantılı olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, e-skuteri sık kullanan kişilere özellikle mesafe bazlı uygun fiyatlandırma seçeneklerinin sunulması, kullanıcı memnuniyetini artırarak işletme verimini yükseltebilecektir. Ayrıca mesafe bazlı artan ya da kullanım sıklığı bazlı azalan ücretlendirme seçeneklerinin bu türün kullanımını da artıracığı düşünülmektedir.

İlerleyen çalışmalarda incelenmesi fayda sağlayacak bazı öneriler şu şekildedir:

- Bölgede e-skuter kullanımından dolayı bedensel engelli kişilerin hareketliliğinin olumsuz etkilenmemesi irdelenmesi gereken önemli konulardan biridir. Özellikle yollara rastgele park edilebilen e-skuterler bu bireylerin ulaşımını engelleyebilmektedir. Bu doğrultuda yayalar açısından e-skuter ulaşım planlaması ve e-skuterlerin ses ve ışık uyarılı bir hale getirilmesi konuları üzerine düşünülmelidir.
- Gençlerin daha fazla tercih ettiği ve çoğunlukla yürüme yerine kullanılan e-skuterlerin kullanımının artmasının zamanla fiziksel aktiviteleri düşürebileceği görülmektedir. Bu konunun detaylı irdelenmesi gereken önemli bir araştırma konusu olduğu düşünülmektedir.
- E-skuterler mevcut durumda çoğunlukla diğer taşıt trafiği ile beraber kullanıldığı için kullanıcı güvenliğini artıracak önlemler üzerinde çalışılmalıdır. Bu önlemler kullanıcı üzerindeki koruyucu ekipmanların (kask, dizlik vb.) belirlenmesi ve güvenli araç donanımlarının (arkadan gelen trafiği görebilmeleri için araca ayna eklenmesi vb.) saptanması üzerine de olmalıdır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] A. D. Bozzi and A. Aguilera, "Shared e-scooters: A review of uses, health and environmental impacts, and policy implications of a

new micro-mobility service,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, pp. 8676, August 2021. doi:10.3390/su13168676

- [2] Collins, “Definition of e-scooter,” *collinsdictionary.com*. [Online]. Available: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/e-scooter>. [Accessed: Dec. 27, 2022].
- [3] H. Güldür, F. Karaçor, S. Hatipoğlu, and K. Çubuk, “Yeni bir kent içi ulaşım türü: E-scooter,” *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 60-73, April 2022. doi:10.30855/gmbd.2022.01.04
- [4] S. Tuncer and B. Brown, “E-scooters on the ground: lessons for redesigning urban micro-mobility,” *In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, April 2020. doi:10.1145/3313831.3376499
- [5] T. C. Cumhurbaşkanlığı Resmi Gazete, “Elektrikli skuter yönetmeliği,” *resmigazete.gov.tr*, April 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/04/20210414-3.htm>. [Accessed: Dec. 27, 2022].
- [6] J. K. Mathew, M. Liu, S. Seeder, H. Li, and D. M. Bullock, “Analysis of e-scooter trips and their temporal usage patterns,” *ITE Journal, Institute of Transportation Engineers*, vol. 89, no. 6, pp. 44–49, June 2019.
- [7] J. Jiao and S. Bai, “Understanding the shared e-scooter travels in Austin, TX,” *ISPRS, International Journal of Geo-Information*, vol. 9, no. 2, pp. 135, February 2020. doi:10.3390/ijgi9020135
- [8] R. L. Sanders, M. Branion-Calles, and T. A. Nelson, “To scoot or not to scoot: Findings from a recent survey about the benefits and barriers of using e-scooters for riders and non-riders,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 139, pp. 217–227, September 2020. doi:10.1016/j.tra.2020.07.009
- [9] Z. Christoforou, A. de Bortoli, C. Gioldasis, and R. Seidowsky, “Who is using e-scooters and how? Evidence from Paris,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 92, pp. 102708, March 2021. doi:10.1016/j.trd.2021.102708
- [10] M. C. Bölen and O. Çeliker, “Paylaşımlı elektrikli scooter hizmetlerini kullanma niyetinde etkili olan faktörler,” *Atatürk University, Journal of Economics and Administrative Sciences*, vol. 35, no. 3, pp. 1101–1123, July 2021. doi:10.16951/atauniiibd.898594
- [11] H. Fitt and A. Curl, “E-scooter use in New Zealand: Insights around some frequently asked questions,” University of Canterbury: Christchurch, New Zealand, June 2019, <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/16336>.
- [12] B. Laa and U. Leth, “Survey of e-scooter users in Vienna: Who they are and how they ride,” *Journal Transport Geography*, vol. 89, pp. 102874, December 2020. doi:10.1016/j.jtrangeo.2020.102874
- [13] Á. Aguilera-García, J. Gomez, and N. Sobrino, “Exploring the adoption of moped scooter-sharing systems in Spanish urban areas,” *Cities*, vol. 96, pp. 102424, January 2020. doi:10.1016/j.cities.2019.102424
- [14] M. Branis, G. Balint, J. Takacs, M. Sulik, and A. Galkin, “Shared electric scooters like a tool of a micro-mobility in cities,” 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings, *SGEM 2020*, Albena, Bulgaria, August 16-25, 2020. doi:10.5593/sgem2020/6.1/s27.082
- [15] J. Degele, A. Gorr, K. Haas, D. Kormann, S. Kraus, P. Lipinski, M. Tenbih, C. Koppenhoefer, J. Fauser, and D. Hertweck, “Identifying e-scooter sharing customer segments using clustering,” *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Germany, June 17-20, 2018. pp. 1–8. doi:10.1109/ICE.2018.8436288
- [16] T. Eccarius and C.-C. Lu, “Adoption intentions for micro-mobility – Insights from electric scooter sharing in Taiwan,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 84, pp. 102327, July 2020. doi:10.1016/j.trd.2020.102327
- [17] K. Fang, A. W. Agrawal, J. Steele, J. J. Hunter, and A. M. Hooper, “Where do riders park dockless, shared electric scooters? Findings from San Jose, California,” San Jose State University, Mineta Transportation Institute, Project 1713, November 2018. [Online]. Available: https://scholarworks.sjsu.edu/mti_publications/251/. [Accessed: Dec. 27, 2022].
- [18] K. C. English, J. R. Allen, K. Rix, D. F. Zane, C. M. Ziebell, C. V. R. Brown, and L. H. Brown, “The characteristics of dockless electric rental scooter-related injuries in a large U.S. city,” *Traffic Injury Prevention*, vol. 21, no. 7, pp. 476–481, August 2020. doi:10.1080/15389588.2020.1804059
- [19] Q. Ma, H. Yang, A. Mayhue, Y. Sun, Z. Huang, and Y. Ma, “E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 151, pp. 105954, March 2021. doi:10.1016/j.aap.2020.105954
- [20] J. K. Mathew, M. Liu, and D. M. Bullock, “Impact of weather on shared electric scooter utilization,” *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Auckland, New Zealand, October 27-30, 2019. pp. 4512–4516. doi:10.1109/ITSC.2019.8917121
- [21] Y. C. Yavuz, “İstanbul’da mikro hareketlilik: Paylaşımlı e-skuter kullanıcı özellikleri ve karşılaşılan zorluklar,” M. Sc. dissertation, İstanbul Technical University, Graduate School, İstanbul, Turkey, 2021.
- [22] B. Moraloğlu, Ş. Cenani, and G. Çağdaş, “A decision support system for placing shared e-scooters: A case study for Istanbul,” *Journal of Computational Design*, vol. 2, no. 2, pp. 127–148, September 2021. doi:10.53710/jcode.978704
- [23] D. Glavić, A. Trpković, M. Milenković, and S. Jevremović, “The e-scooter potential to change urban mobility-Belgrade case study,” *Sustainability*, vol. 13, no. 11, pp. 5948, May 2021. doi:10.3390/su13115948

- [24] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, "Haberler," uab.gov.tr, September 13, 2020. [Online]. Available: <https://www.uab.gov.tr/haberler/e-scooter-yonetmeligi-nde-ilk-adim-atildi>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [25] İ. Seyrek, "Yeni bir kentsel hareketlilik modu ve neoliberal öznenin kendisine yatırım aracı olarak paylaşımlı e-scooter sistemleri: İstanbul örneği," M. Sc. dissertation, Marmara University, Institute of Social Sciences, İstanbul, Turkey, 2022.
- [26] TÜİK, "Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları," Türkiye İstatistik Kurumu, [tuik.gov.tr](https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr). [Online]. Available: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [27] W. G. Cochran, *Sampling Techniques, 2nd Edition*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1963.
- [28] A. Curl and H. Fitt, "Same same, but different? Cycling and e-scooter in a rapidly changing urban transport landscape," *New Zealand Geographer*, vol. 76, no. 3, pp. 194–206, September 2020. doi:10.1111/nzg.12271
- [29] S. Rejali, K. Aghabayk, A. Mohammadi, and N. Shiwakoti, "Assessing a priori acceptance of shared dockless e-scooters in Iran," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 100, pp. 103042, November 2021. doi:10.1016/j.trd.2021.103042
- [30] A. Speak, M. Taratula-Lyons, W. Clayton, and I. Shergold, "Scooter stories: User and non-user experiences of a shared e-scooter trial," *Active Travel Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 1–28, 2023, doi:10.16997/ats.1195
- [31] ESRI, "ArcGIS Pro 3.0," Environmental Systems Research Institute, [esri.com](https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview). [Online]. Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [32] M. Güngör, "Ki-kare testi üzerine," *Firat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 84–89, November 2008. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fudad/issue/47171/593924>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [33] A. Nikiforiadis, E. Paschalidis, N. Stamatiadis, N. Paloka, E. Tsekoura, and S. Basbas, "E-scooters and other mode trip chaining: Preferences and attitudes of university students," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 170, pp. 103636, April 2023. doi:10.1016/j.tra.2023.103636
- [34] N. Haworth, A. Schramm, and D. Twisk, "Changes in shared and private e-scooter use in Brisbane, Australia and their safety implications," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 163, pp. 106451, December 2021. doi:10.1016/j.aap.2021.106451
- [35] K. Baek, H. Lee, J.-H. Chung, and J. Kim, "Electric scooter sharing: How do people value it as a last-mile transportation mode?," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 90, pp. 102642, January 2021. doi:10.1016/j.trd.2020.102642
- [36] IBM, "SPSS Statistics" [ibm.com](https://www.ibm.com/products/spss-statistics). [Online]. <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [37] E. Cevahir, *SPSS ile Nicel Veri Analizi Rehberi*. Kibele Yayınları, 2020.
- [38] R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.
- [39] G. H. Freeman and J. H. Halton, "Note on an exact treatment of contingency, goodness of fit and other problems of significance," *Biometrika*, vol. 38, no. 1/2, pp. 141–149, June 1951. doi:10.2307/2332323
- [40] Y. Karagöz, "İlişki katsayıları ile öğrenci başarısını etkileyen faktörlerin belirlenmesi," *Electronic Journal of Social Sciences*, vol. 9, no. 32, pp. 425–446, June 2010. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/esosder/issue/6146/82522>. [Accessed: Mar. 31, 2023].
- [41] R. M. Dawes and B. Corrigan, "Linear models in decision making," *Psychological Bulletin*, vol. 81, no. 2, pp. 95–106, 1974. doi:10.1037/h0037613
- [42] M. Durmuş, "Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin karşılaştırılması," M. Sc. dissertation, Uşak University, Institute of Social Sciences, Uşak, Turkey, 2015.
- [43] C. Hardt and K. Bogenberger, "Usage of e-scooters in urban environments," *Transportation Research Procedia*, vol. 37, pp. 155–162, 2019. doi:10.1016/j.trpro.2018.12.178
- [44] T. Eccarius and C.-C. Lu, "Exploring consumer reasoning in usage intention for electric scooter sharing," *Transportation Planning Journal*, vol. 47, no. 4, pp. 271–295, December 2018. doi:10.6402/TPJ

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Fuzzy Classifier Design for Detection of Floating or Stationary Targets using Navigational Radar Data

Hande Erkaymaz^a, Semih Duran^b, Buğrahan COŞKUN^c, Ali Ertuğrul Şahin^d

Submitted: 12.02.2023 Revised: 06.03.2023 Accepted: 07.06.2023 doi:10.30855/gmbd.0705073

ABSTRACT

Keywords: Radar, Fuzzy Classifier, Maritime surface object classification.

^a National Defence University,
Turkish Naval Academy,
Dept. of Elect. Electronics Engineering
34942- İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3226-0627
e mail: herkaymaz@dho.edu.tr

^b National Defence University,
Turkish Naval Academy,
Dept. of Elect. Electronics Engineering
34942- İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3292-5561
e mail: semihduran511@gmail.com

^c National Defence University,
Turkish Naval Academy,
Dept. of Elect. Electronics Engineering
34942- İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7299-6455
e mail: bugrahancoskun98@gmail.com

^d National Defence University,
Turkish Naval Academy,
Dept. of Elect. Electronics Engineering
34942- İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0003-4074-3266
e mail: Arda_55400@icloud.com

*Corresponding author:
herkaymaz@dho.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Seyir Radarı,
Bulanık sınıflandırıcı, Deniz üstü
nesne sınıflandırma

The most important resource in navigational safety for marine vehicles is radar information. The information from the radar is read continuously by an operator and the navigation process is tried to be carried out safely. In navigational safety, it is very important that the operator does not misclassify for object detection. In this study, for the first time in the literature, a fuzzy logic-based classifier has been created for navigational safety in the light of information obtained from radar with artificial intelligence. The classifier is designed to detect vessels, land, buoys and unidentified objects. Since there is no data set presented in the literature, fuzzy logic model, which is an expert-based artificial intelligence method, has been preferred. On the other hand, in order to test the performance of the model, a dataset is proposed with the algorithm designed synthetically from the help of expert experiences. As a result of the analysis, it has been shown that the fuzzy model can detect objects successfully. Moreover, it is predicted that this model will play a key role in the design of intelligent radar systems in the future

Seyir Radar Verileri Kullanılarak Yüzen veya Sabit Hedeflerin Tespiti İçin Bulanık Sınıflandırıcı Tasarımı

ÖZ

Deniz araçları için seyir güvenliğinde en önemli kaynak radar bilgisidir. Radardan gelen bilgiler bir operatör tarafında sürekli okunarak seyir süreci güvenli şekilde yürütülmeye çalışılmaktadır. Seyir güvenliğinde, nesne tespiti için operatörün hatalı sınıflandırma yapmaması çok önemli bir durumdur. Buradan hareketle bu çalışmada, literatürde ilk defa yapay zekâ ile radardan alınan bilgiler ışığında seyir güvenliği için bulanık mantık temelli bir sınıflandırıcı oluşturulmuştur. Sınıflandırıcı, deniz araçları, kara parçası, şamandıra ve tanımsız nesnelere algılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Hali hazırda literatürde sunulan bir veri seti olmaması nedeniyle uzman temelli yapay zekâ metodu olan bulanık mantık modeli tercih edilmiştir. Diğer taraftan, oluşturulan modelin başarımını test etmek için, uzman deneyimleri yardımıyla sentetik olarak oluşturulan algoritma ile bir veri seti önerilmiş ve model bu veriyle test edilmiştir. Analiz sonucunda bulanık modelin başarılı biçimde nesne tespiti yapabildiği gösterilmiştir. Dahası, bu modelin gelecekte akıllı radar sistemleri tasarımları için anahtar rol oynayacağı öngörülmektedir.

1. Giriş (Introduction)

Mühendislik Tasarımı, fiziksel çözüm uzayında iyi tanımlanmış ihtiyaçları karşılayan ürünü oluşturmak için yürütülen faaliyetler olarak ifade edilebilir. Bu faaliyetler yürütülürken sürekli yenilenen bir süreç söz konusudur. Tasarımcı, tasarım sırasında deneyimlere, algılara veya bazı temel matematiksel analizlere dayalı olarak sistemin bir ön tasarımını geliştirir. Ön tasarımın kabul edilebilir olup olmadığını belirlemek için analizler yapılır.

Radarlar, teknolojik olarak radyo dalgaları ile taşınan enerjinin uzaktaki nesneye ulaşip yansırarak tekrar kaynağa geri dönmesi ile elde edilen bilgiyi işleyerek nesne tipi, yön ve uzaklık kestirimlerini yapabilen cihazlardır [1]. Genel olarak kullanım alanlarına göre hava ve deniz radarları olmak üzere ikiye ayrılırken, çalıştığı frekans bandına (x band, s band) göre de sınıflandırılabilirler. Bir radar temelde sinyal üretici, verici, alıcı ve anten yapılarından oluşmaktadır [1] [2]. Bu yapısal düzende birden fazla kontrol edilebilen anten teknolojisi kullanılarak adaptif hedef takibi ve önceliklendirme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu işlemsel süreçte, hız, boyut, pozisyon ve yön parametreleri radar başarımını artırmak için öncelikli olarak kullanılmaktadır.

Son yüzyılda, endüstrinin pek çok alanında doğrusal olmayan karar sistemlerinde başarımı artırmak amacıyla yapay zekâ metotları sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [3]. Özellikle Zadeh, 1965 yılında önerilen bulanık küme teorisi, bir kümeye ait olma kararsızlığının daha iyi modellenebilmesi nedeniyle kontrol ve benzetim alanlarında sıklıkla kullanılabilir hale gelmiştir [4]. Diğer yapay zekâ metotlarının aksine uzman deneyimleriyle oluşturulan kural tabanı yardımıyla parametre kestiriminde başarımının yüksek olduğu gözlemlenmiştir [4-6]. Son zamanlarda deniz araçlarının seyir süreçlerinde, takip, tehdit ve çarpışma risk analizi sınıflandırmalarında Bulanık Mantık (BM) yaklaşımı başarılı bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Hava araçlarında; Beşer ve arkadaşları, tasarladıkları 4 girişli (Mesafe, Hız, İrtifa ve Tırmanma Oranı) ve 1 (Tehdit seviyesi) çıkışlı BM model tasarlanmıştır. Alınan girişlere göre denizde veya havadaki araçlar için tehdit seviyesi farklı senaryolar için test edilerek başarımları ortaya konulmuştur [7]. Er, yapmış olduğu tez çalışmasında, faz dizili radar optimum parametrelerinin ayarlanması amacıyla BM model tasarlamıştır [8]. Modelde, hedefler üzerinde radar hüzmesinin hedef üzerinde kalma ve tekrar bakma sürelerini tanımlayan TBS değerleri ayarlanmak suretiyle tespit ve takip başarımı artırılmaya çalışılmıştır. Son aşamada model, farklı test senaryolarıyla test edilmiş ve istatistiksel başarımları ortaya konulmuştur. Coşkun, 2021 yılında önerdiği tez çalışmasında radar kaynaklı bir hava savunma sistemi tasarlamıştır [9]. Bu sistem radar bilgilerinden elde edilen bilgileri giriş olarak hedef nesnenin tehdit seviyesini BM model ile kestirmeye çalışmaktadır. Testler sonucunda önerilen modelin yaklaşık %99.8 gibi yüksek bir başarıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Diğer taraftan deniz araçlarında; Shaukat ve Otero, deniz altılar için gerçek zamanlı bir konum tespit modeli önermişlerdir [10]. Bu model, BM ve radial temelli yapay sinir ağlarını birlikte kullanarak değişen koşullarda konum sapmalarını hızlı tespit edebilmektedir. Önerilen modelin başarımları Monte Carlo simülasyonlarıyla test edilerek gösterilmiştir. Liu ve arkadaşları, geleceğin deniz araçları olarak kabul edilen otonom gemilerde hedef gemi türünü belirlemek amacıyla radar sinyalleri ve otomatik tanımlama sistemleri (AIS) verilerini birleştirerek kullanan kalman filtreli hibrit bir bulanık mantık temelli karar sistemi oluşturmuşlardır [11]. Sistemin farklı senaryolar yardımıyla çoklu gemileri algılayabildiği gösterilmiştir. Shi ve Arkadaşları, bölgesel gemi çarpışma riskini tahmin etmek için bir BM model ortaya koymuşlardır [12]. Yapılan analizlerde önerilen modelin risk analizini başarılı şekilde kestirebildiği ortaya konulmuştur. Çınar, BM temelli bir radar kaynak yönetim sistemi önermiştir [13]. Tasarlanan sistem, savaş gemilerinin yoğun trafik koşullarında radar sistemlerinin karar modüllerinden kaynaklı gecikmeleri azaltacak şekilde hızlı ve doğru karara ulaşmayı amaçlamaktadır. Böylece daha güvenilir ve hatasız radar takipleri icra edileceği vurgulanmıştır. Meng ve Tian, hipersonik araçların (HGVs) tanımlanıp izlenebilmesi için sıralı radar verilerini işleyerek araç tehdit sınıflandırmasını yapabilecek tip 2 BM modeli önermişlerdir [14]. Bu modelde, radar yankılarından gelen darbeleri kutupsal olarak değerlendirip araçların manevra, hız, azimut ve mesafe verileri matematiksel olarak hesaplanarak BM modele giriş olarak sunulmuştur. Simülasyon sonucunda, modelin hedef aracı kesin bir izleme oranı, ortalama ilk öncelik, net bir tehdit derecesi ve daha kısa bir dengeleme süresi ile başarılı şekilde tespit edip izleyebildiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada, literatür araştırmalarında gözlemlendiği üzere deniz seyir sürecinde radar tabanlı nesne sınıflandırma işlemi insan kaynağı tabanlı olması nedeniyle insan hatalarını minimum indirmek ve son karara yardımcı bir akıllı model oluşturmak amacıyla literatürde ilk defa uzman temelli BM tabanlı bir sınıflandırıcı tasarlanmıştır. Elde edilen sınıflandırıcı, sentetik olarak hazırlanan farklı senaryolar ile analiz edilip test edilmiştir.

2. Materyal ve Metod (Material and Method)

2.1. Veri seti ve Ön hazırlık (Dataset and Pre-processing)

Sınıflandırıcı modelin tasarımında, hazır bir veri seti olmaması nedeniyle askeri ve sivil radar seyir uzmanlarından bilgiler alınarak tasarlanan modelin giriş kriterleri belirlenmiştir. Ek olarak radar çıktıları analiz edilerek belirlenen girişlerin nicel sınırları hesaplanmıştır. Önerilen BM sınıflandırıcı 4 giriş ve 1 çıkışa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Burada, Hız, boyut, pozisyon ve yön bilgileri giriş, Nesne sınıfı bilgisi ise çıkış olarak seçilmiştir. Toplamda 1427 örnek ile oluşturulan veri setine ait istatistik sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Model girdi ve çıktılarının istatistiksel sınırları (Statistical limits of model inputs and outputs).

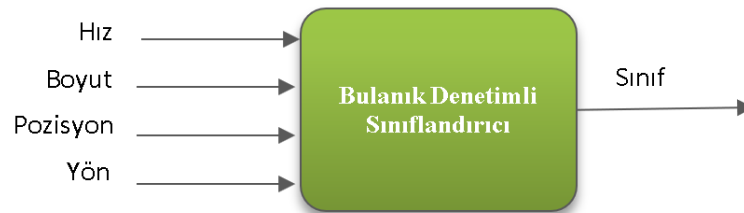
		Min-Max	Ort.	Std
Girişler	Hız	0-40 (knot)	14.69	9.397
	Boyut	0-500(m)	207.53	108.57
	Pozisyon	Sabit-Değişken	0.996	0.065
	Yön	0-1	0.996	0.065
Çıkış	Sınıf	0-7		

2.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Bulanık Mantık(BM) çıkarım sistemi(FIS), uzman deneyimine dayalı bulanık küme teorisine dayalı bir yapay zekâ modelidir [3]. Genellikle kontrolcü olarak görülen BM modeller son zamanlarda sınıflandırıcı olarak ta karşımıza çıkmaktadır. Temel olarak doğrusal olmayan test zorlukları sürecinde uzman deneyimi ile kararsızlık durumunu çok iyi modelleyebilmektedir [3] [4]. BM modeller; girişlerin dilsel ifadeler ile betimlenmesi (bulanıklaştırma), Dilsel ifadelerden bulanık çıktıların elde edilmesi için kestirim kurallarının oluşturulması (Kural Tabanı) ve bulanık çıktıların gerçek çıkışlara dönüştürülmesi (Durulaştırma) süreçlerini içermektedir. BM başarımı en çok deneyimlerden oluşturulan kural tabanına bağlı olarak değişmektedir. Literatürde, Mamdani ve Takagi-Sugeno çıkarım yöntemleri ile bulanık kümelerden dilsel çıktıların elde edilmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerdir [15] [16] .

2.3. Bulanık sınıflandırıcı model (Fuzzy classifier model)

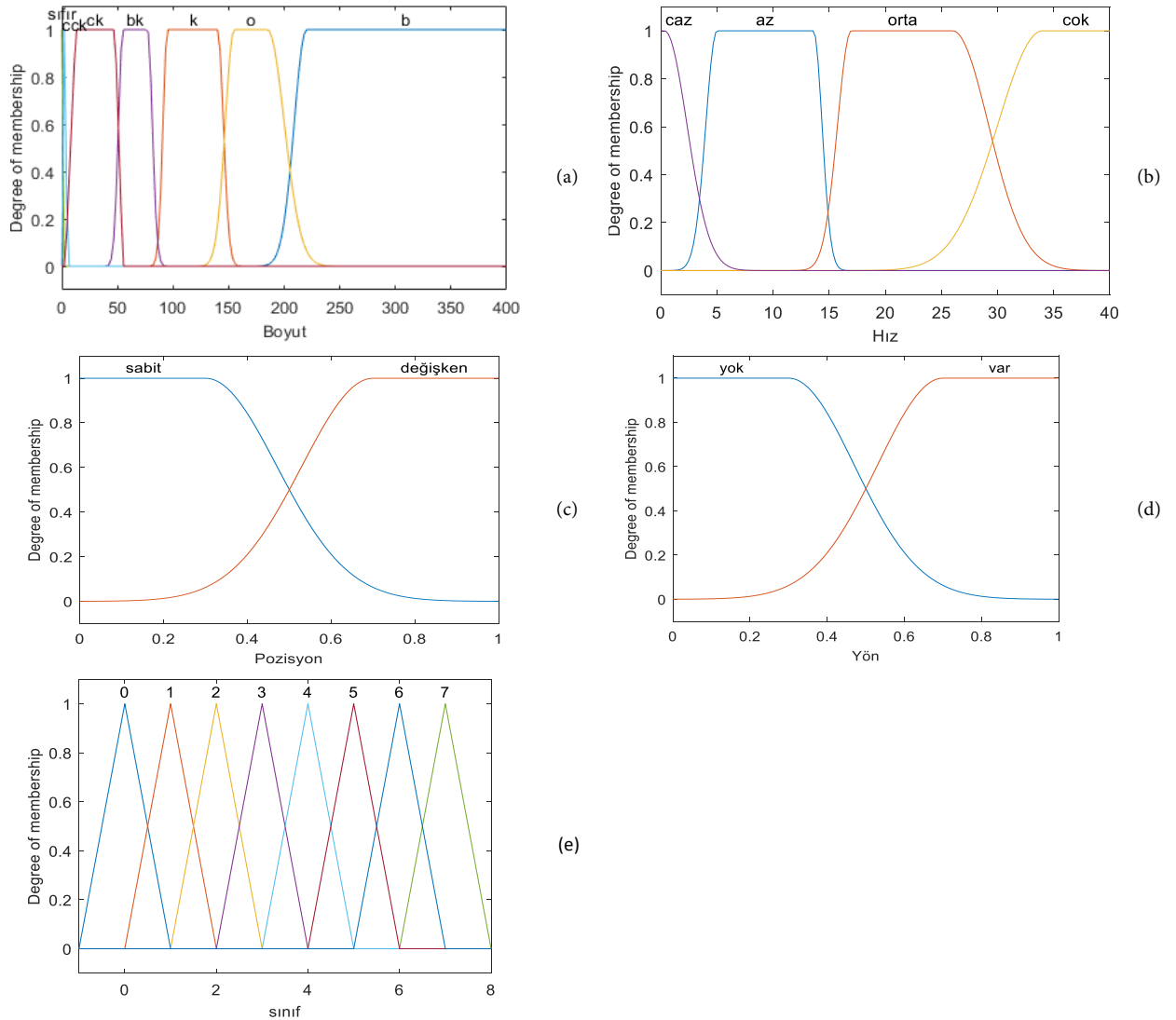
Çalışmada, dört giriş, 1 çıkışlı bulanık sınıflandırıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Model, Mamdani yöntemi temelli ve 4 giriş – 1 çıkış olacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarıma ait model blok diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tasarlanan bulanık sınıflandırıcının blok şeması (Block diagram of designed fuzzy classifier)

Model girişleri olarak, radar yansılıyla(echo) elde edilen Boyut, Hız pozisyon ve yön gibi veriler seçilmiştir. Boyut girdisi(Şekil 2a); 0-400m aralığında, 7 üyelik kümesi kullanılarak, hız girdisi(Şekil 2b); 0-40knot aralığında, 4 üyelik kümesiyle, pozisyon(Şekil 2c) ve yön(Şekil 2d) girdileri; 0-1 aralığında 2 üyelik kümesi ile tasarlanmıştır. Diğer taraftan, çıkış olarak 8 üyelik kümesinden oluşan sınıf bilgisi tasarımı

oluşturmuştur(Şekil 2e). Burada 8 sınıf; 0 bilinmeyen cisim, 1 kara parçası, 2 şamandıra, 3 balıkçı teknesi, 4 destroyer, 5 fırkateyn, 6 hücumbot, 7 uçak gemisi olarak düşünülmüştür. Girişler ve çıkış bulanık fonksiyonlar ile modellenerek tasarımın bulanıklaştırma aşaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Bulanık sınıflandırıcı giriş üyelik fonksiyonları, a) Boyut, b) Hız, c) Pozisyon, d) Yön, e) Çıkış üyelik fonksiyonu (Fuzzy classifier input membership functions, a): Size, b) Velocity, c) Position, d) Direction, e) Output membership function).

Uzman görüşlerinden elde edilen kıstaslar yardımıyla, bulanık sınıflandırıcının kural tabanı oluşturulmuş ve örnek olarak, kural tabanında kullanılan 8 adet kural Tablo 2’de gösterilmiştir.

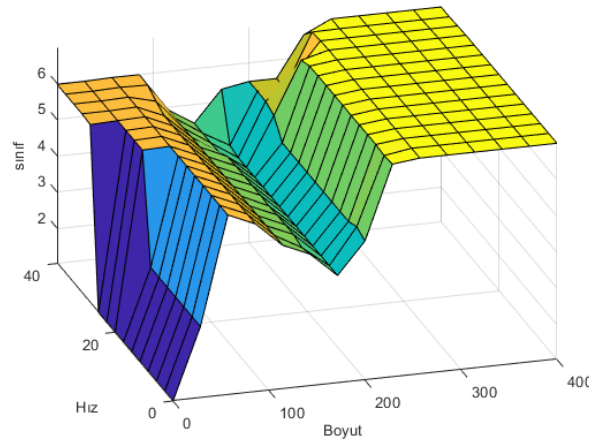
Tablo 2. Örnek kural tabanı uzayı (Sample rule base space).

Kurallar	Girişler				Çıkış
	Boyut	Hız	Pozisyon	Yön	
K1	sifir	caz	sabit	yok	1
K2	cck	caz	değişken	yok	0
K3	ck	az	değişken	var	3
K4	bk	az	değişken	var	6
K5	cck	caz	sabit	yok	2
K6	b	orta	değişken	var	7
K7	o	az	değişken	var	4
K8	o	orta	değişken	var	4

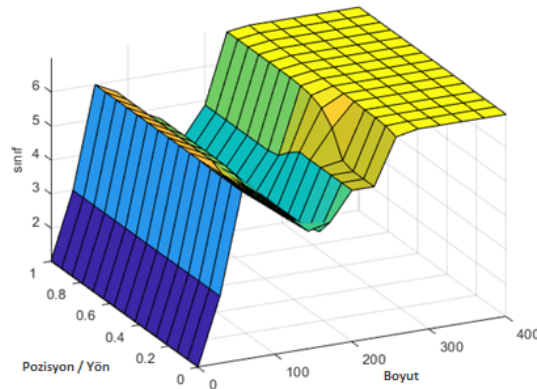
Tasarımın son aşamasında ise ağırlık merkezi çıkarım yöntemi kullanılarak bulanık çıkışlar durulaştırılarak, gerçek çıkışlara dönüştürülmüştür. İstatistiksel başarı kriterleri yardımıyla ortaya konulan modelin başarımı ölçülmüştür.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen model tasarımında, literatürde hali hazırda bir veri seti bulunmamaktadır. Bu bağlamda, tasarım aşaması seyir radar konusunda uzman personelin deneyimleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Buradan hareket ile tasarlanan modelin doğruluğunda giriş ve çıkışlar arasındaki korelasyonun seviyesi artırılmaya çalışılmıştır. Önerilen bulanık modelin performansını analiz edebilmek için, giriş uzayına karşılık, çıkışın yüzey grafikleri çizilerek karakteristiksel davranış ortaya konulmuştur. Gözlemlenen yüzey grafikleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Bulanık sınıflandırıcının 3D giriş-çıkış uzayındaki davranışı; a) boyut, hız ve çıkış arası, b) boyut, pozisyon/yön ve çıkış arası (Behavior of fuzzy classifier in 3D input-output space; a) between size, velocity and output, b) between size, position/direction and output).

Şekil 3'te görüldüğü gibi çıkış davranışını boyut ve hız girdileri direkt olarak etkilemekte ve özellikle boyut girdisi aralıklarında çıkışın önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Askeri seyir sırasında radar analizlerindeki beklentilerle örtüşen şekilde sınıflandırma yoğunluğunun 50-250m aralığında gürbüz etkiye sahip olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, pozisyon ve yön bilgileri aynı aralıkta sınıflandırma keskinliğini artırıp başarımı artırdığı ölçümlenmiştir.

Son olarak, tasarlanan sınıflandırıcının başarımını ölçmek amacıyla uzman temelli gözlemler dikkate alınarak sentetik bir veri seti oluşturulmaya çalışılmıştır. Veri seti sınır aralıklarında rastgele olarak belirlenmiştir. Veri setinde, her sınıf için birden fazla örnek olacak şekilde, aralık genişlikleri göz önüne alınarak homojene yakın olarak 490 örneklilik veri uzayı elde edilmiştir. Elde edilen veri setinin dağılımını göstermek için rastgele 48 örnek seçilmiş ve model başarımı bu senaryo ile test edilmiştir. Test kriterleri olarak, ortalama mutlak hata(Mae), ortalama karesel hata(Mse) ve Determinasyon Katsayısı (R2) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. 48 örneklı rassal veri seti için istatistik analiz sonuçları (Statistical analysis results for 48-sample random dataset.).

Boyut	Hız	Poz.	Yön	Beklenen	Tahmin edilen	Mutlak Fark	Karesel Fark
2	3	1	1	0	0.0025	0.0025	0.0000
2	2	1	1	0	0.0016	0.0016	0.0000
0	0	0	0	1	1.0005	0.0005	0.0000
2	0	0	0	2	1.9995	0.0005	0.0000
4	0	0	0	2	2.0000	0.0000	0.0000
1	0	0	0	2	1.9995	0.0005	0.0000
5	0	0	0	2	3.0050	1.0050	1.0100
3	0	0	0	2	1.9995	0.0005	0.0000
23	6	1	1	3	3.0001	0.0001	0.0000
9	3	1	1	3	3.0005	0.0005	0.0000
51	8	1	1	3	4.5321	1.5321	2.3474
13	13	1	1	3	3.0001	0.0001	0.0000
17	11	1	1	3	3.0001	0.0001	0.0000
43	11	1	1	3	3.0641	0.0641	0.0041
30	7	1	1	3	3.0001	0.0001	0.0000
5	2	1	1	3	3.0007	0.0007	0.0000
150	28	1	1	4	4.2027	0.2027	0.0411
194	28	1	1	4	4.3239	0.3239	0.1049
161	12	1	1	4	4.0004	0.0004	0.0000
171	22	1	1	4	4.0002	0.0002	0.0000
179	4	1	1	4	4.0067	0.0067	0.0000
198	12	1	1	4	4.6519	0.6519	0.4249
180	28	1	1	4	4.0080	0.0080	0.0001
182	18	1	1	4	4.0149	0.0149	0.0002
106	30	1	1	5	4.9996	0.0004	0.0000
98	30	1	1	5	4.9996	0.0004	0.0000
138	23	1	1	5	4.8627	0.1373	0.0188
136	25	1	1	5	4.9162	0.0838	0.0070
145	11	1	1	5	4.5601	0.4399	0.1936
106	30	1	1	5	4.9996	0.0004	0.0000
116	9	1	1	5	4.9997	0.0003	0.0000
141	12	1	1	5	4.7520	0.2480	0.0615
55	35	1	1	6	5.9995	0.0005	0.0000
69	32	1	1	6	5.9996	0.0005	0.0000
62	22	1	1	6	5.9995	0.0005	0.0000
59	11	1	1	6	5.9995	0.0005	0.0000
62	18	1	1	6	5.9995	0.0005	0.0000
71	1	1	1	6	5.9994	0.0006	0.0000
66	30	1	1	6	5.9996	0.0004	0.0000
71	20	1	1	6	5.9995	0.0005	0.0000
367	4	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
269	13	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
214	20	1	1	7	6.3218	0.6782	0.4600
230	22	1	1	7	6.9346	0.0654	0.0043
316	18	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
372	23	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
357	7	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
330	22	1	1	7	6.9993	0.0007	0.0000
					Mae: 0.1142	R² 0.9739	
					Mse: 0.0975		

Tablo 3'te görüldüğü gibi, 48 örneklı rastgele seçilen veri seti için istatistiksel test sonuçları; ortalama mutlak hata 0.11, ortalama karesel hata ise 0.097 ve determinasyon katsayısı ise yaklaşık %97 olarak elde edilmiştir.

Diğer taraftan sentetik olarak elde edilen 490 örneklı tüm veri setine ait istatistiksel başarımlar sonuçları da elde edilmiş ayrı ayrı tüm sınıflara ait sınıflandırma başarımlarını karmaşıklık matrisi ve istatistiksel analiz ile elde edilmiştir. Şekil 4'te tüm veri seti için modelin sınıfsal başarımlar oranları ve Tablo 4'te ise tüm veri seti için gözlemlenen istatistiksel başarımlar oranları gösterilmiştir.

0	4						
1		1					
2			4	1			
3				78	4	7	
4					95	5	
5						90	1
6							100
7							4
							91
	0	1	2	3	4	5	6
	Tahmin Edilen						

Şekil 4. Tüm veri seti için sınıf bazlı başarımlar oranları (Class-based success rates for all dataset).

Tablo 4. Tüm veri seti istatistiksel başarımlar sonuçları (All dataset statistical performance results).

Sınıflar	Mae	Mse	Doğruluk (%100)
0	0.002012	4.25311E-06	100
1	0.000495	2.45074E-07	100
2	0.201311	0.202005158	80
3	0.187613	0.254575179	87.64
4	0.095957	0.034915954	95
5	0.101563	0.049110894	93.75
6	0.000513	2.73184E-07	100
7	0.045727	0.035971431	95.79
		R²	0.96858481

Şekil 4 ve Tablo 4 analiz edildiğinde tasarlanan bulanık sınıflandırıcının ortalama 0.085 mutlak hata, ortalama 0.072 karesel hata ile düşük bir tahmin hatasına, 0.96 determinasyon katsayısı ile başarılı bir korelasyon ortalamasına ve ortalama %94.49 doğruluk katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Önerilen model, deneyim tabanlı oluşturulan veri seti ile test edildiğinde tüm sınıflar için %80 ve üzerinde sınıflandırma başarımlarını sergilemiştir.

4. Sonuçlar (Conclusion)

Deniz seyir sürecinde radar üzerinde nesne tespiti insan kontrolü ile sağlanmaktadır. Bu nedenle, insan kaynaklı hata nedeniyle ticari ve askeri gemiler için zaman zaman istenmeyen problemlerle karşılaşılabilir. Bu çalışmada, seyir sürecinde radar tahminlerinin yapay zekâ ile yapılması amacıyla bir karar destek sistemi ortaya konulmuştur. Daha önce literatürde ortaya konulmuş bir veri seti olmaması nedeniyle burada uzman temelli bir yapay zekâ algoritması olan Tip 1 Bulanık mantık metodu seçilmiş ve literatürde ilk defa bulanık tabanlı bir radar tahmin modeli geliştirilmiştir.

Tasarlanan model analiz edildiğinde görülmüştür ki, bulanık sınıflandırıcı 8 sınıfı başarılı bir şekilde algılayabilmektedir (%80 ve üzeri). Analiz sonuçlarında, sırasıyla modelin; şamandıra için aralığın çok düşük olması nedeniyle %80, balıkçı gemisi için %88, firkateyn için %93.45, destroyer için %95, uçak gemisi için %95.8, kara parçası, bilinmeyen cisim ve hücum bot sınıflarını ise %100 başarımlar ile tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Toplamda bu çalışma ile literatürde ilk defa radarlar için akıllı bir model sunulmuştur. Bulanık mantık algoritmasının kararsızlığı iyi modelleyebilmesi ve uzman tabanlı olması nedeniyle sınıflandırma başarımlarını yüksek bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, çalışma ile literatüre yeni bir veri seti öngörüsü de sunulmuştur. Böylece gelecek çalışmalara ışık tutacaktır.

Çalışmanın kısıtları, bazı sınıfların ölçüm aralıklarının kısa olmasının başarımlarını düşürmesi, literatürde daha önceden bir veri setinin bulunmaması ve seçilen radara göre aralıkların değişebilirliği olarak

öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, model tasarımı tip 2 bulanık model ve diğer yapay zekâ modelleri ile gerçekleştirilmeye çalışılacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill Book Co., 1980.
- [2] G. Ludeno, A. Orlandi, C. Lugni, C. Brandini, F. Soldovieri, F. Serafino, "X-band marine radar system for high-speed navigation purposes: A test case on a cruise ship," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 244-248, 2013. doi:10.1109/LGRS.2013.2254464
- [3] G. Kaya, O. Erkaymaz, Z. Saraç, "Optimization of digital holographic setup by a fuzzy logic prediction system," *Expert Systems with Applications*, vol. 56, pp. 177-185, 2016. doi:10.1016/j.eswa.2016.03.019
- [4] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no.3, pp. 338-353, 1965. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy algorithms," *Information and Control*, vol. 12, no. 2, pp. 94-102, 1998. doi:10.1016/S0019-9958(68)90211-8
- [6] C. Elmas, *Bulanık Mantık Denetleyiciler*, Ankara: Seçkin Yayınevi, 2003.
- [7] F. Beşer, D. Adıgüzel, Ö. Yıldırım, T. Yıldırım, "Air Defence Decision Support System Design Using Fuzzy Logic," *Akıllı Sistemler ve Uygulamaları Dergisi*, vol. 1, no. 2, pp. 135-139, 2018. doi:10.54856/jiswa.201812042
- [8] E. Mumammer, "Bulanık sistemler ile faz dizilimli radar parametrelerinin gerçek zamanlı ayarlanması," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2019.
- [9] M. Coşkun, "Hava savunma sistemlerinde bulanık mantık tabanlı tehdit değerlendirme ve derecelendirme," Yüksek Lisans Tezi, Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2021.
- [10] N. Shaukat, P. Otero, "Underwater Vehicle Positioning by Fuzzy and Neural Adaptive Kalman Sensor Fusion," in Proc. of OCEANS 2021: San Diego-Porto, 20-23 Sept. 2021, San Diego, CA, USA [Online]. Available: IEEE Xplore, https://ieeexplore.ieee.org/document/9705963. [Accessed: Jan, 7, 2023].
- [11] W. Liu, Y. Liu, B. A. Gunawan, R. Bucknall, "Practical moving target detection in maritime environments using fuzzy multi-sensor data fusion," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 6, pp. 1860-1878, 2021. doi:10.1007/s40815-020-00963-1
- [12] Z. Shi, R. Zhen, J. Liu, "Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment," *Ocean Engineering*, vol. 259, pp. 111847, 2022. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.111847
- [13] M. Çınar, "Çok fonksiyonlu radarlar için yeni bir radar kaynak yönetimi yaklaşımı," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
- [14] F. Meng, K. Tian, "Interval type-2 fuzzy logic based radar task priority assignment method for detecting hypersonic-glide vehicles," *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 488-501, 2022. doi:10.1631/FITEE.2000560
- [15] E. Mamdani, S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975. doi:10.1016/S0020-7373(75)80002-2
- [16] M. Sugeno, *Industrial Applications of Fuzzy Control*, First Edition, New York: Elsevier Science Ltd., 1985.
- [17] D. R. L. Dufton, C. G. Collier, "Fuzzy logic filtering of radar reflectivity to remove non-meteorological echoes using dual polarization radar moments," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 8, no. 10, pp. 3985-4000, 2015. Doi:10.5194/amt-8-3985-2015
- [18] L. A. Zadeh, K. Tanaka, K.S. Fu, M. Shimura, Ed., *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes*. Berkeley, California: Academic Press, 1975. (Editör)
- [19] D. Boyacı, M. Erdoğan, F. Yıldız, "Arazi Örtüsü Tespitinde Bulanık Mantık Sınıflandırma: Ankara Bölgesinde Örnek Uygulama," *Harita Dergisi*, vol. 81, no.153, pp. 34-41, 2015.

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

