

International  
Journal of 3D Printing  
Technologies and Digital Industry

**IJ3DPTDI**



Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri  
ve Dijital Endüstri  
Dergisi

Vol: 8

Issue: 1

2024

Cilt: 8

Sayı: 1

## **Sayın Yazarlar;**

Dergimize 4 dilde (Türkçe Tr, İngilizce En, Rusça Ru ve Ukraynaca Ua) yazı kabul etmekteyiz. Türkçe, Rusça ve Ukraynaca yazılarda İngilizce özet yazılması zorunludur.

## **ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ VE DİJİTAL ENDÜSTRİ dergisi,**

IJ3DPTDI, Endüstri 4.0 – dijital endüstri teknolojileri, 3B yazıcı teknolojileri, katmanlı-eklemeli imalat teknolojileri ve uygulamaları yani mühendislik, bilim, teknoloji gibi tüm disiplinlerle ilgili araştırmaların sonuçlarını yaymak için açık, hakemli, disiplinlerarası, uluslararası, bilimsel, akademik, online bir dergidir. ij3dptdi, Mühendislik, Teknoloji ve Bilimin Endüstri 4.0 daki uygulamaları, tüm araştırmaları, gözden geçirme makalelerini, kısa bilgi paylaşımlarını ve önemli ilerlemeleri sunan teknik notları online yayınlamak için yazarları davet eder.

Endüstri 4.0, Dijital Endüstri, 3B Yazıcılar üzerine tüm bilimsel mühendislik araştırma ve teknoloji alanı konuları;

**3B baskı için tıbbi uygulamalar;** dokuların ve organların biyografik baskıları, 3B vaskülarize organların oluşturulmasında karşılaşılan zorluklar, özelleştirilmiş implantlar ve protezler, düşük maliyetli protez parçaları, cerrahi hazırlık için anatomik modeller, sentetik cilt, kafatası değişimi, tıbbi donatımı, kemik, özel üretilen sensörler, kişiselleştirilmiş ilaç dozu, benzersiz dozaj şekilleri, kompleks ilaç salınım profilleri v.d.

**3B yazıcı uygulama alanları;** tıbbi ve diş hekimliği uygulamaları, diş hekimliği uygulamaları ve materyalleri, yumuşak robotik sistemleri, robot tutucu sistemler, bina uygulamaları, kalıp / kalıp uygulamaları, mimarlık uygulamaları, model uygulamaları, hızlı prototip uygulamaları, görsel sanat uygulamaları, tekstil uygulamaları, dijital fabrikalar, mimari model uygulamaları ve malzemeleri, endüstriyel uygulamalar ve malzemeler, gıda uygulamaları ve malzemeleri, sanatsal uygulamalar ve malzemeler, tarama yöntemleri ve modelleme v.d.

**Endüstri 4.0 ve dijital sanayi;** büyük veri, yapay zeka, dijital yaşam döngüsü, sensör motorları, artırılmış gerçeklik, görselleştirme, sistem simülasyonu, kablosuz iletişim, BİT güvenlik, dijital iş, blok zinciri, veri Güvenliği, özerk robotlar, sistem entegrasyonu, nesnelerin interneti (IoTs), siber güvenlik, bulut bilişim, dijital fabrika v.d.

**3B yazıcı tasarım, modelleme ve analiz;** 3D yazıcı tasarımı, ekstruder tasarımı, 3B baskı için ürün geliştirme, seramik sistemleri tasarımı, gıda sistemleri tasarımı, elektronik bileşenleri, mekanik parçalar, standart bileşenler v.d.

**3B yazıcı malzeme ve mekanik özellikleri;** polimer malzemeler, esnek malzemeler, biyo malzemeler, metalik malzemeler, toz malzeme üretim yöntemleri, ağaç malzemeler, kompozit malzemeler v.d.

**3B yazıcı program kontrol teknolojileri;** kontrol programları, tasarım programları, 3D tarama teknolojileri, DMLS teknolojileri, SLA teknolojileri, SLS teknolojileri, FDM teknolojileri, dijital üretim teknolojileri, diğer 3B yazıcı teknolojileri v.d.

ij3dptdi, online yayınlanan bir dergidir ve yılda 3 defa yayınlanır.

- 1.peryot Ocak-Nisan
- 2.peryot Mayıs-Ağustos
- 3.peryot Eylül-Aralık

**ISSN** 2602-3350

web-site : <http://dergipark.gov.tr/ij3dptdi>

e-mail : [korayozsoy32@gmail.com](mailto:korayozsoy32@gmail.com)

**Dear author,**

Our Journal accepts articles in 4 languages (Turkish Tr, English En, Russian Ru and Ukrainian Ua). Articles in Turkish, Russian and Ukrainian must have an abstract in English.

**International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry**

ij3dptdi, is an open access peer-reviewed, interdisciplinary international platform for disseminating results of relevant research related to all the disciplines of engineering, science, technology etc on Industry 4.0 - digital industry technologies, 3D printer technologies, additive manufacturing technologies and applications . ij3dptdi, invites all research, review articles, short communications & technical notes that describe significant advances research in the areas of Engineering, Technology, Science on Industry 4.0, Digital Industry, 3D Printers, additive manufacturing;

**All scientific engineering research & technology area** on Industry 4.0, Digital Industry and 3D printers;

**Medical applications for 3D printing;** bioprinting tissues and organs, challenges in building 3D vascularized organs, customized implants and prostheses, low-cost prosthetic parts, anatomical models for surgical preparation, synthetic skin, cranium replacement, medical equipment, bone, tailor-made sensors, personalized drug dosing, unique dosage forms, complex drug-release profiles ect.

**Application fields;** medical and dental applications, dental practices and materials, soft robotics systems, robot gripper systems, building applications, die/mold applications, architecture applications, models applications, rapid prototype applications, visual arts applications, textile applications, digital factories, architectural-model applications and materials, industrial applications and materials, food applications and materials, artistic practices and materials, scanning methods and modeling ect.

**Digital industry;** big data, artificial intelligence, digital life cycles, sensors actuators, augmented reality, visualization, system simulation, wireless communication, ICT security, digital business, block chain, data safety, autonomous robots, system integration, internet of things (IT's), cyber security, cloud computing, digital factory ect.

**Design, modelling and analysis;** 3D printer design, extruder design, product development, ceramic systems design, food systems design, table system design, electronics components, mechanic components, standard components ect.

**Mechanical properties of filaments;** polymer materials, flexible materials, bio materials, metallic materials, wood materials, composite materials ect.

**Program** – control technologies; control programs, design programs, 3D scanning technologies, DMLS technologies, SLA technologies, SLS technologies, FDM technologies, Digital production technologies, other 3D printer technologies ect.

ij3dptdi, Its publication frequency is 3 issues per year.

- 1.Period January-April
- 2.period May-August
- 3.period September-December

**ISSN** 2602-3350  
**Web-site:** <http://dergipark.gov.tr/ij3dptdi>  
**E-mail:** [korayozsoy32@gmail.com](mailto:korayozsoy32@gmail.com)

## **Уважаемый автор,**

наш журнал принимает статьи на 4-х языках (турецком, английском, русском и украинском). Статьи на турецком, русском и украинском языках должны сопровождаться аннотацией на английском языке.

## **Международный журнал технологий 3D-печати и цифровой индустрии**

**IJ3DPTDI** – это рецензируемое издание с открытым доступом, междисциплинарная международная платформа для обмена результатами исследований по инженерно-конструкторским разработкам, теоретическим исследованиям, усовершенствованию технологий Индустрии 4.0, в том числе – технологий цифровой промышленности, 3D-печати, аддитивного производства и разработки приложений. **IJ3DPTDI** принимает исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие сообщения и технические заметки, которые описывают значимые результаты исследований в области машиностроения, технологии, теоретической основы индустрии 4.0, цифровой промышленности, 3D печати, производства многокомпонентных материалов.

## **Тематика журнала включает все научно-технические исследования и обзор технологий Индустрии 4.0, цифровой промышленности и 3D печати.**

**Медицинские технологии 3D-печати:** биопринтинг – воспроизведение объемных моделей тканей и органов, создание трехмерных васкуляризированных органов, индивидуализированных имплантатов и протезов, синтетической кожи, костей, замены частей черепа; удешевление технологии протезирования, разработка анатомических моделей для подготовки хирургов, тестовых хирургических операций, медицинского оборудования; изготовление датчиков с заданным набором характеристик, создание уникальных лекарственных препаратов с индивидуальными дозировками, сложных многокомпонентных лекарственных средств.

**Области применения:** материалы и оборудование для медицины и стоматологии, роботизированные системы на основе биологических прототипов, роботизированные захватные устройства, строительные материалы, пресс-формы, модели и прототипы в архитектуре, моделирование реальных объектов, прототипирование, сфера визуального искусства, текстильная промышленность, цифровые заводы, приложения и материалы для архитектурного моделирования, промышленные образцы и материалы, создание пищевых продуктов, технологии художественной обработки материалов, методы моделирования и сканирования и т.п.

**Цифровая индустрия:** большие данные, искусственный интеллект, жизненный цикл цифровых технологий, приводные механизмы датчиков, расширенная реальность, визуализация, моделирование систем, беспроводная связь, ИТ-безопасность, электронная коммерция, блокчейн технологии, безопасность данных, автономные роботы, системная интеграция, интернет вещей, кибербезопасность, облачные вычисления, цифровое производство.

**Дизайн, моделирование и анализ:** моделирование для 3D печати, экструдера; разработка разнообразных продуктов, проектирование систем керамического производства, усовершенствование технологии производства пищевых продуктов, проектирование предметов мебели, электронных компонентов, механических деталей, стандартных компонентов и т.п.

**Механические свойства нитей:** полимерные материалы, гибкие материалы, биоматериалы, изделия из металла и древесины, композиционные материалы.

**Технологии управления приложениями:** контрольные программы, проектные программы, технологии 3D-сканирования, технологии DMLS, SLA, SLS, FDM, цифровые технологии производства, другие технологии 3D-печати и т.п.

Периодичность выхода журнала – 3 раза в год:

1-й выпуск – январь-апрель;

2-й выпуск – май-август;

3-й выпуск – сентябрь-декабрь.

**ISSN** 2602-3350

Сайт журнала: <http://dergipark.gov.tr/ij3dptdi>

Электронная почта: [korayozsoy32@gmail.com](mailto:korayozsoy32@gmail.com)

## **Шановний авторе,**

наш журнал приймає статті на 4-х мовах (турецькою, англійською, російською та українською). Статті турецькою, російською та українською мовою повинні супроводжуватися анотацією англійською мовою.

## **Міжнародний журнал технологій 3D-друку і цифрової індустрії**

**IJ3DPTDI** – це рецензоване видання з відкритим доступом, міждисциплінарна міжнародна платформа для обміну результатами досліджень з інженерно-конструкторських розробок, теоретичних досліджень, удосконалення технологій Індустрії 4.0, в тому числі – технологій цифрової промисловості, 3D-друку, адитивного виробництва і розробки додатків. IJ3DPTDI приймає дослідні статті, оглядові статті, короткі повідомлення і технічні записки, які містять значущі результати досліджень в галузі машинобудування, технології, теоретичній основі індустрії 4.0, цифровій промисловості, 3D друку, виробництва багатокomпонентних матеріалів.

**Тематика журналу охоплює всі науково-технічні дослідження та огляд технологій Індустрії 4.0, цифрової промисловості і 3D друку.**

**Медичні технології 3D-друку:** біопрінтинг – відтворення об'ємних моделей тканин і органів, створення тривимірних васкуляризованих органів, індивідуалізованих імплантатів і протезів, синтетичної шкіри, кісток, заміни частин черепа; здешевлення технології протезування, розроблення анатомічних моделей для підготовки хірургів, тестових хірургічних операцій, медичного обладнання; виготовлення датчиків із заданим набором характеристик, створення унікальних лікарських препаратів із індивідуальними дозуваннями; складних багатокomпонентних лікарських засобів.

**Сфери застосування:** матеріали та обладнання для медицини і стоматології, роботизовані системи на основі біологічних прототипів, роботизовані захватні пристрої, будівельні матеріали, прес-форми, моделі і прототипи в архітектурі, моделювання реальних об'єктів, прототипування, сфера візуального мистецтва, текстильна промисловість, цифрові заводи, додатки та матеріали для архітектурного моделювання, промислові зразки і матеріали, створення харчових продуктів, технології художньої обробки матеріалів, методи моделювання та сканування і т.п.

**Цифрова індустрія:** великі дані, штучний інтелект, життєвий цикл цифрових технологій, приводні механізми датчиків, розширена реальність, візуалізація, моделювання систем, бездротовий зв'язок, IT-безпека, електронна комерція, блокчейн технології, безпека даних, автономні роботи, системна інтеграція, інтернет речей, кібербезпека, хмарні обчислення, цифрове виробництво.

**Дизайн, моделювання і аналіз:** моделювання для 3D друку, екструдера; розробка різноманітних продуктів, проектування систем керамічного виробництва, удосконалення технології виробництва харчових продуктів, проектування предметів меблів, електронних компонентів, механічних деталей, стандартних компонентів і т.п.

**Механічні властивості ниток:** полімерні матеріали, гнучкі матеріали, біоматеріали, вироби з металу і деревини, композиційні матеріали.

**Технології управління додатками:** контрольні програми, проектні програми, технології 3D-сканування, технології DMLS, SLA, SLS, FDM, цифрові технології виробництва, інші технології 3D-друку і т.п.

Періодичність виходу журналу – 3 рази на рік:

1-й випуск – січень-квітень;

2-й випуск – травень-серпень;

3-й випуск – вересень-грудень.

**ISSN** 2602-3350  
**Web-site:** <http://dergipark.gov.tr/ij3dptdi>  
**E-mail:** [korayozsoy32@gmail.com](mailto:korayozsoy32@gmail.com)

# ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

Cilt:8 Sayı: 1 Yıl: 2024

---

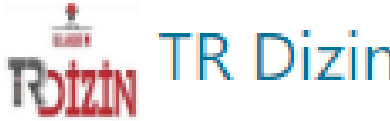
## INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

Volume:8 Number: 1 Year: 2024

-----  
ISSN: 2602-3350  
-----

Yazıların tüm bilimsel sorumluluğu yazar(lar)a aittir. Editör, yardımcı editör ve yayıncı dergide yayımlanan yazılar için herhangi bir sorumluluk kabul etmez. Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır. All the scientific responsibilities of the manuscripts belong to the authors (s). The editor, assistant editor and publisher accept no responsibility for the articles published in the journal. The Journal is indexed by the following abstracting and indexing databases.

**TR Dizin, Google Scholar, ResearchBib, Index Copernicus, Asos indeks**



<http://dergipark.gov.tr/ij3dptdi>



**Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi /  
International Journal of 3D Printing Technologies and Digital  
Industry**

**Vol: 8, No:1 (2024)**

**Cilt: 8, Sayı:1 (2024)**

**Editörler ve Kurullar / Editors and Boards**

**Yayın Kurulu Başkanı / Publication Board Manager**

Dr. Kerim ÇETİNKAYA, Antalya BELEK Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, TÜRKİYE

**Baş Editörler / Editor(s)-in-Chief**

Dr. Kerim ÇETİNKAYA, Antalya BELEK Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, TÜRKİYE

Dr. Koray ÖZSOY, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, TÜRKİYE

**Editörler Kurulu / Editorial Board**

Dr. Burhan DUMAN, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Ahu ÇELEBİ, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Hatice EVLEN, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Murat Aydın, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Emaka AMALU, Teesside Üniversitesi, Doğa ve Bilim Bölümü, Middlesbrough, İNGİLTERE

Dr. Hanane ZERMANE, Batna 2 Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, CEZAYİR

Dr. Serhii Yevseiev, Simon Kuznets Kharkiv Ulusal Ekonomi Üniversitesi, Siber Güvenlik ve Bilgi Teknolojileri Bölümü, UKRAYNA

Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Bekir AKSOY, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. İshak ERTUĞRUL, Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Mekatronik Programı, TÜRKİYE

Dr. Levent AYDIN, Kocaeli Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Sağlık Bakım Hizmetleri Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Kıyas KAYAALP, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. Senai YALÇINKAYA, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Dr. İbrahim KARAAĞAÇ, İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, TÜRKİYE

Dr. Yasin HAMARAT, Biyoteknoloji, Kaunas University Of Technology, LİTVANYA

Dr. Binnur SAĞBAŞ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

**Mizanpaj Editörü/ Layout Editor**

Mehmet YÜCEL, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

Arda PAZARCIKCI, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

**Danışma Kurulu / Advisory Board**

Dr. M. Cengiz KAYACAN, SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. N. Nnamdi EKERE, WOLVERHAMPTON UNIVERSITY, UK

Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ, GAZİ ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Cem SİNANOĞLU, ERCİYES ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Mustafa BOZDEMİR KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Savaş DİLİBAL, İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Cem Bülent ÜSTÜNDAĞ, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Ahmet CAN, NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Fuat KARTAL, KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. İhsan TOKTAŞ, YILDIRIM BEYAZIT ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Okan ORAL, AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Barış Berat BULDUM, MERSİN ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. Serap ÇELEN, EGE ÜNİVERSİTESİ, TR



































Dr. Mustafa Aydın, KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ, TR














Dr. Serkan BÜRKEN, OSTİM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, TR

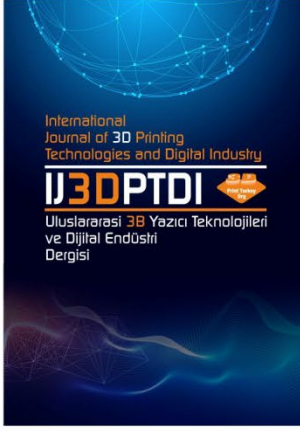
Dr. Samsun M. BAŞARICI, AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ, TR

Dr. İsmail BÖĞREKÇİ, AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ, TR

ISSN 2602-3350

<b>İçindekiler /Table of Contents</b>	<b>Sayfa /Pages</b>
<b>Araştırma Makaleleri/Research Articles</b>	
<b>CHARACTERIZATION OF 3D PRINTED CONDUCTIVE FLEXIBLE MATERIALS FOR SOFT ROBOTIC APPLICATIONS</b>	<b>1-7</b>
Ozan Arslan <sup>a</sup>  , Ozgun Selvi <sup>b*</sup>  , Onat Halis Totuk <sup>c</sup> 	
<b>CONCEPT DESIGN FOR OPTIMIZING MASS PRODUCTION PROCESSES WITH 3D PRINTER IN THE INDUSTRY</b>	<b>8-19</b>
Özge Villi <sup>a</sup>  , Osman Villi <sup>b</sup>  , Hakan Yavuz <sup>c</sup> 	
<b>BEŞ EKSEN CNC SICAK TEL STRAFOR KESİM MAKİNESİ İMALATI</b>	<b>20-31</b>
Onur CEYLAN <sup>a</sup>  , Ahmet KABUL <sup>a</sup> 	
<b>APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION ON A 3D-PRINTED SHELF BRACKET</b>	<b>32-45</b>
Berker Özün Fenni <sup>a</sup>  , Ersin Eken <sup>a</sup>  , Hüseyin Kaygısız <sup>b</sup> 	
<b>EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDE KULLANILABİLECEK PARALEL KİNEMATİK YAPIYA SAHİP 5 SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK SİSTEMİN MATEMATİKSEL ANALİZİ VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ</b>	<b>46-58</b>
Ahmet DUMLU <sup>a</sup>  , Mehran Mahboubkhah <sup>b</sup>  , Kağan Koray AYTEN <sup>a</sup>  Sadrettin GÖLCÜGEZLİ <sup>a</sup>  Gürkan KALINAY <sup>a</sup> 	
<b>ÖĞRETMENLERİN 3B YAZICI ÖĞRENME VE UYGULAMA DENEYİMLERİ</b>	<b>59-70</b>
Esra ŞAHBAZ <sup>a</sup>  , Hasan GÖKÇE <sup>a</sup>  , Hilal KARABULUT <sup>a*</sup> 	
<b>DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF 3D-PRINTED POROUS POLYLACTIC ACID/HYDROXYAPATITE SCAFFOLDS</b>	<b>71-79</b>
Nurcan Acar <sup>a</sup>  , M. Kürşat Terzi <sup>a</sup>  , Adem Yılmaz <sup>a</sup>  , Rümeyza Aydoğdu <sup>a</sup>  , Büşra Mutlu <sup>a,b</sup>  , Şeyma Duman <sup>a</sup> 	
<b>ÜÇ BOYUTLU YAZICIYLA ÜRETİLMİŞ YÜZEY BASKILI ELEKTROT BENZERİ SİSTEMİN ELEKTROKİMYASAL UYGULAMASI</b>	<b>80-91</b>
Levent Özcan <sup>a</sup>  , Ahmet Fatih Yuran <sup>a</sup> 	
<b>ENHANCING MEDICAL OFFICER SCHEDULING IN HEALTHCARE ORGANIZATIONS: A COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF GENETIC AND GOOGLE OR TOOLS ALGORITHMS FOR MULTI-PROJECT RESOURCE-CONSTRAINED OPTIMIZATION</b>	<b>92-103</b>
Osama Burak Elhalid <sup>a</sup>  , Ali Hakan Işık <sup>a</sup> 	
<b>DENİM KUMAŞLARIN GÖRÜNTÜ TAHMİNLEMESİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİ VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI</b>	<b>104-113</b>
Orbay Çağlayan Şimşek <sup>a,b</sup>  , Emel Kızılkaya Aydoğan <sup>c</sup>  , Yılmaz Delice <sup>d</sup> 	
<b>PLA ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET FİLAMENLERİNİN 3D FDM BASKIDA BOYUTSAL DOĞRULUK ve GERİÇEKİLME PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI</b>	<b>114-123</b>
Elif AKTEPE <sup>a</sup>  , Şükriye AKTEPE <sup>b</sup> 	

<b>PRODUCTION OF Ni-HARD ALLOY POWDERS BY GAS ATOMIZATION</b>	
Onur MURATAL <sup>a,b</sup>  , Rıdvan YAMANOĞLU <sup>a</sup>  , Can DURAN <sup>a</sup>  , Yiğit GÖNÜLALAN <sup>a</sup>  , Yağız AKYILDIZ <sup>a,c</sup>  , Funda GÜL KOÇ <sup>a</sup>  , Burak BARUTÇUOĞLU <sup>a,d</sup> 	<b>124-129</b>
<b>ADVANCING INDUSTRY 4.0 WITH ROS: A CASE STUDY ON AUTONOMOUS MOBILE ROBOT TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS</b>	<b>130-142</b>
Neslihan DEMİR <sup>a,b</sup>  , Pinar DEMIRCIOĞLU <sup>a,c</sup>  , İsmail BOGREKCI <sup>a*</sup> 	
<b>DİJİTAL DÖNÜŞÜM ENDEKSİ PARAMETRELERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>143-153</b>
İrem Düzdar Argun <sup>a</sup>  , Zülal Beşbaş <sup>a</sup>  , Ufuk Öztürk Peker <sup>a</sup> 	



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## CHARACTERIZATION OF 3D PRINTED CONDUCTIVE FLEXIBLE MATERIALS FOR SOFT ROBOTIC APPLICATIONS

**Yazarlar (Authors):** Ozan Arslan<sup>ID</sup>, Ozgun Selvi<sup>ID</sup>, Onat Halis Totuk<sup>ID</sup>

*Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Arslan O., Selvi O., Totuk O. H., "Characterization of 3D Printed Conductive Flexible Materials for Soft Robotic Applications" Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 8(1): 1-7, (2024).*

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1349314

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# CHARACTERIZATION OF 3D PRINTED CONDUCTIVE FLEXIBLE MATERIALS FOR SOFT ROBOTIC APPLICATIONS

Ozan Arslan<sup>a</sup> , Ozgun Selvi<sup>b\*</sup> , Onat Halis Totuk<sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Turkish Aerospace Industries, ANKARA

<sup>b</sup>University of Central Lancashire, School of Engineering and Computing, Preston, United Kingdom

<sup>c</sup>Çankaya University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, ANKARA

\* Corresponding Author: [oselvi@uclan.ac.uk](mailto:oselvi@uclan.ac.uk)

(Received: 24.08.23; Revised: 21.11.23; Accepted: 04.01.24)

---

## ABSTRACT

Soft robots composed of compliant and flexible materials can safely interact with humans and adapt to unstructured environments. However, integrating sensors, actuators, and control circuits into soft structures remains challenging. Additive manufacturing shows promise for fabricating soft robots with embedded electronics using conductive flexible composites. Nevertheless, there is still a limited understanding of the electromechanical behavior of 3D-printed conductive structures when subjected to the types of strains relevant to soft robotics applications. Optimized design requires characterizing the interplay between a soft component's changing shape and electrical properties during deformation. This study investigates the application of 3D printing technology to fabricate various geometries using a conductive, flexible material for soft robotic applications. The primary objective is to understand and characterize the behavior of differently shaped 3D-printed conductive materials under various mechanical stresses. Two distinct test setups are designed for conducting bending and tensile tests on the produced materials. Diverse geometries are printed using the conductive flexible material with desirable mechanical and electrical properties to employ tensile and bending tests. The experiments reveal a direct correlation between shape change and electrical resistance of the 3D printed materials, providing valuable insights into their adaptability for soft robotics. According to numerical results, honeycomb profiles are found to be the most linear and stable profile type. This research not only contributes to the field of flexible conductive materials but also lays the foundation for integrating these materials into future engineering designs, potentially enabling the development of highly responsive and adaptable devices for various industries.

**Keywords:** Soft Robotics, Characterization, Conductive Filament, 3D Printed.

---

## 1. INTRODUCTION

Soft robotics is a rapidly growing field that aims to create robots that can interact with complex and dynamic environments, such as the human body, natural habitats, and industrial settings[1]. Soft robots are typically made of flexible and deformable materials that can change their shape and functionality in response to external stimuli, such as mechanical stress, temperature, or electric fields [2-4]. One of the advantages of soft robots is that they can achieve high levels of adaptability, compliance, and safety, which are desirable for applications such as biomedical devices, wearable sensors, and soft actuators [5-6]. However, one of the challenges in soft robotics is to find suitable

materials that can exhibit both mechanical and electrical properties, such as conductivity, elasticity, and durability. Conductivity is essential for soft robots that need to sense their environment, communicate with other devices, or perform electrical functions [7]. Additive manufacturing, or 3D printing, enables the digital fabrication of complex geometries using soft-compliant materials, making it a promising manufacturing method for soft robots. 3D printing electrically conductive composites allow the integration of stretchable sensors and circuits into soft robotic structures. This could enable rapid design iterations and fabrication of fully functional soft robots with integrated electronics.

Various conductive micro and nano-scale fillers have been incorporated into flexible polymer matrices to print stretchable conductive composites [8-10]. Materials like thermoplastic polyurethane (TPU) and silicone rubber have suitable elasticity and deformability for soft robotic applications but do not conduct electricity independently [11-12]. Adding conductive fillers like carbon black nanoparticles provides pathways for electrical conductivity through the insulating polymer matrix without excessively compromising flexibility [13-14]. This has enabled 3D printing of soft sensors, actuators, and circuitry by fused filament fabrication of conductive composite filaments [15].

The consistency and scalability of the 3D printing process allow fabricating conductive components with complex geometries, embedded wiring, and personalized designs [16-17]. Integration of printed stretchable sensors and actuators could enhance the functionality and adaptability of soft robots without rigid components [18]. For example, printed strain gauges can cover a soft robot's body to provide proprioceptive sensing for control [11]. Printed flexible conductive traces can connect sensors to control circuitry and replace soldered wires prone to detachment from soft structures. Printed electrodes can enable dielectric elastomer actuators that deform in response to applied voltages [8].

However, there remain challenges in optimizing the composition and printing process to achieve the high conductivity required for sensors and circuits without compromising mechanical performance [9]. The adhesion, conductivity, stretchability, and consistency of printed composites depend on factors like filler material, size, loading fraction, distribution, and orientation within the flexible matrix. Effective incorporation of fillers also relies on suitable printing parameters and the resulting microstructures. A systematic understanding of these relationships is needed to design optimized conductive composite materials and print reliable integrated electronics.

This study investigates the influence of shape and deformation on the electrical resistance of 3D-printed conductive flexible specimens. Bending and tensile tests are conducted on diverse geometries printed with a conductive

thermoplastic material. The objective is to characterize and understand the electromechanical behavior of 3D-printed conductive materials for soft robotic applications. The results provide insights into developing responsive and adaptive soft devices using 3D printing and conductive materials.

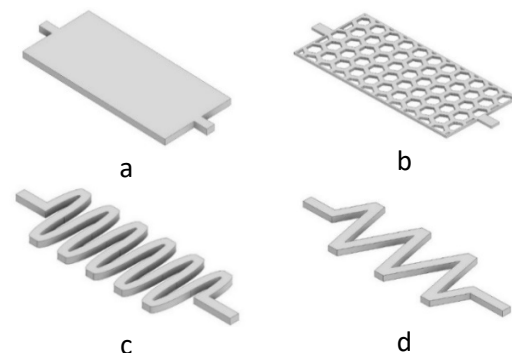
## 2. MATERIAL AND METHOD

The materials used in this study consisted of a conductive flexible filament (EEL by NinjaTek) and a silicone-based mixture (Dragon Skin). The filament was 3D-printed into various shapes and thicknesses, and the mixture was used as a coating layer. The methods involved bending and tensile tests to measure the electrical resistance of the specimens under different loading conditions.

The conductive flexible filament is a thermoplastic elastomer (TPE) with carbon black particles that provide electrical conductivity. The filament has a diameter of 1.75 mm and a shore hardness of 85A. The electrical resistance of the filament was reported to be 0.6 ohm/cm by the manufacturer.

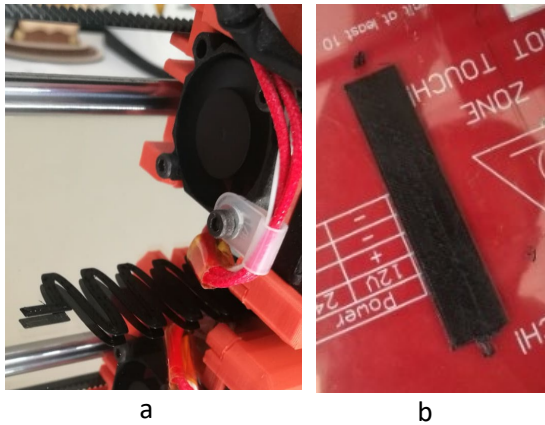
The silicone-based mixture (Dragon Skin) was obtained from Smooth-On. It is a two-component platinum-cure silicone rubber that cures at room temperature. The mixture has a shore hardness of 10A and a pot life of 20 minutes. The mixture is transparent and can be colored with pigments.

The specimens were designed in honeycomb, rectangular, Z- and S-shapes (Figure 1) to evaluate a range of common geometries widely studied for their mechanical properties and deformation behaviors.



**Figure 1.** Solid models of the conductive profile designs: a) rectangular, b) honeycomb, c) S-shaped, d) Z-shaped.

These shapes provide established theoretical frameworks and experimental data for benchmarking while also enabling a broad understanding of how geometry affects performance across diverse soft robotics applications. The thicknesses ranged from 0.4 mm to 1.5 mm. The test specimens were 3D-printed using a MakerBot Replicator 2X printer. The printer settings were as follows: nozzle temperature of 230°C, bed temperature of 110°C, extrusion speed of 60 mm/s, layer height of 0.2 mm, and infill density of 100% (Figure 2).

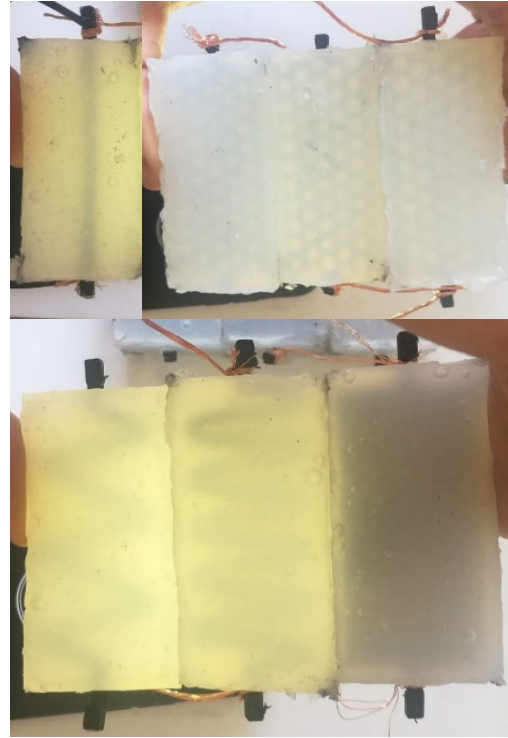


**Figure 2.** 3D printed test specimens; a) S-shaped, b) rectangular

The silicone-based mixture (Dragon Skin) was used to coat the specimens and form sandwich-like structures. The coating process involved mixing the two components of the mixture in a 1:1 ratio by weight, pouring them into a mold with the desired shape and size, placing the printed specimen in the middle of the mold, filling the rest of the mold with the mixture, and letting it cure for four hours at room temperature. The coated specimens were then taken out of the mold and trimmed to remove excess material. The final specimens had a length of 100 mm, a width of 20 mm, and a total thickness of 2 mm (including the coating layer). Figure 3 shows pictures of the coated specimens.

Conductive filament on soft sensors is the focus of this study, as this area is under-researched. No characterization or data exists on the combination of soft material and conductive flexible filaments on soft sensors. The bending and tensile tests are two basic tests to understand the elasticity versus conductivity profile of soft sensors. The results can be

presented as the percentage of elongation, which can approximate the maximum elongation without damage. A similar approach can also provide comparable results for the bending test.



**Figure 3.** Cured and prepared test specimens.

The tests were standardized by using mountable test setups, calibrated measurement tools, and consistent environmental conditions. A 3D-printed mountable test apparatus was used for the bending test. ABS was chosen as the material for the test setup. Different combinations of length, width, and height were calculated and angles of 30°, 45°, and 60° were obtained. The bending test apparatus was designed in two parts to facilitate mounting and demounting. The upper part had a semicircular shape and was called the forcing part; the lower part had a lunate shape and was called the base part. Figure 4 shows the size comparison of the bending test setup apparatus and Figure 5 shows the bended test specimen.



**Figure 4.** 3D printed bending test apparatus.

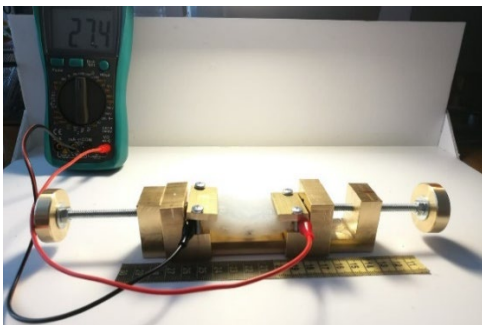


A digital multimeter was used for both bending and tensile test measurements. The tensile test was performed by clamping the test specimen between sliding detachable jaws and securing it with the compressive force of screws. The turning knob was marked to indicate the starting and ending point of one turn. Since one turn corresponded to 1 mm by choosing an M6 bolt, the test specimen was stretched by 1 mm increments.



**Figure 5.** The test specimen was placed and clamped on the bending test setup.

A tape measure was used to verify the amount of movement and to double-check the accuracy. Insulation was a very critical point for the tensile test, as well as for the bending test. Hot silicone was used as the insulation material, and it was spread on the surface of the jaws that touched the test specimen surface. Figure 6 shows the resistance measurement.



**Figure 6.** Measurement moment from tensile test on all elements view.

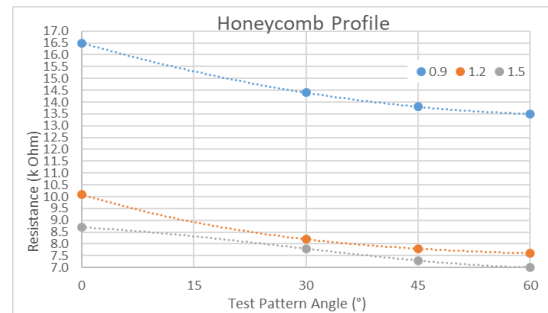
### 3. RESULTS

The results section demonstrates how different shapes and thicknesses of 3D-printed conductive flexible materials affect their resistance under bending and tensile stresses. The results were presented in graphs and tables with trendlines, comments, and legends. The trendlines were based on the resistance formula that involves area and length as variables. The bending angle and the resistance change were

compared for different shape groups. The slope and resistance formulas were used to compare and generalize the results.

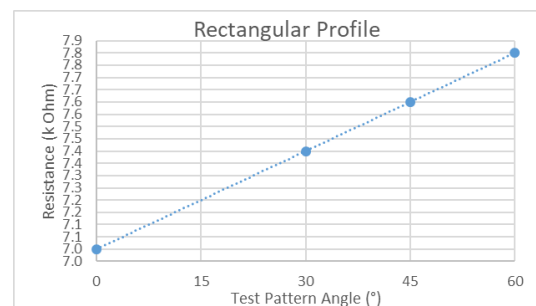
#### 3.1. Bending Test Results

The first step of the analysis was to produce honeycomb profiles with different thicknesses: 0.9 mm, 1.2 mm, and 1.5 mm. The specimens were subjected to the same force on different test setups. The data collected from the experiments was plotted on a graph, which is shown in Figure 7.



**Figure 7.** Bending Test Results Graph for Honeycomb Profiles.

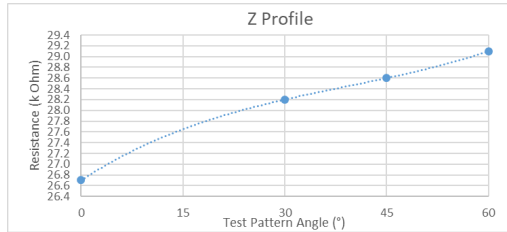
The results showed that the resistance of the honeycomb profile specimens decreased as the angle of bending increased. This indicated that there was an inverse proportionality between the bending angle and the resistance for this shape. The thickness of the specimens also affected the resistance change, as thicker specimens showed less sensitivity to bending. Therefore, the resistance and the thickness of the honeycomb profiles had a direct proportionality. Another shape that was tested was the rectangular profile, which had a single thickness of 1.0 mm. The same force was applied to this specimen as to the others, and the results were plotted on a graph in Figure 8.



**Figure 8.** Bending Test Results Graph for Rectangular Profile.

The resistance and the bending angle had a direct proportion for rectangular profiles. The

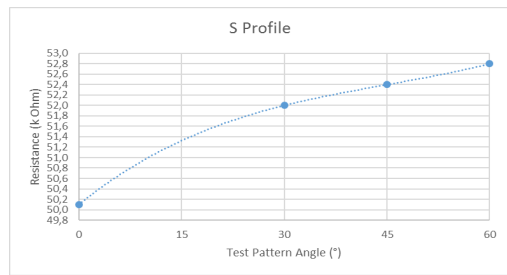
effect of shapes on the resistance among profiles will be discussed at the end of the section. The "Z" shaped profiles were another group of test specimens with a single thickness of 1.0 mm. The same force was applied to these specimens as to the others. The results are shown in Figure 9.



**Figure 9.** Bending Test Results Graph for "Z" Shaped Profile.

The "Z" shaped profile had a constant thickness, which meant that there was no variation in the thickness. Therefore, the slope and thickness effect could not be examined for this profile. The resistance and the bending angle had a direct proportion for the "Z" shaped profile.

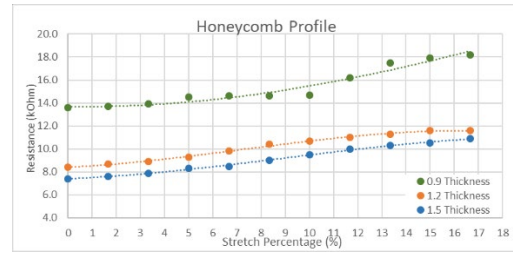
The "S" shaped profile was the last one with a single thickness of 1.0 mm. The same force was applied to this specimen as to the others. The results are displayed in the graph in Figure 10. The profile also had a single thickness, so the slope and thickness effect could not be examined for this profile either. The resistance and the bending angle had a direct proportion for the "S" shaped profile.



**Figure 10.** Bending Test Results Graph for "S" Shaped Profile.

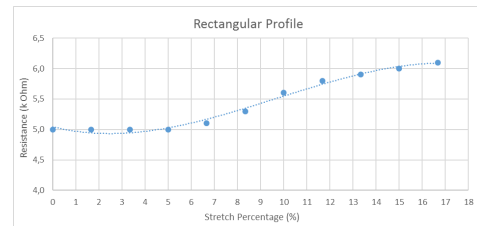
### 3.2. Tensile Test Results

The tensile test results for honeycomb profiles were obtained by applying a constant force to specimens with different thicknesses (0.9 mm, 1.2 mm, and 1.5 mm) and measuring their resistance as they were stretched to the same length. The data were plotted on a graph in Figure 11.

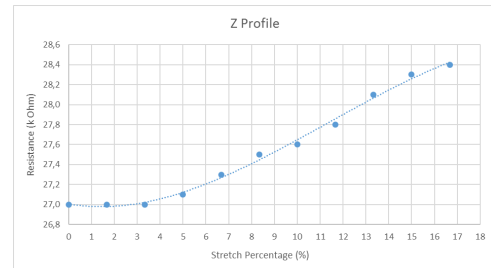


**Figure 11.** Tensile Test Results Graph for Honeycomb Profiles.

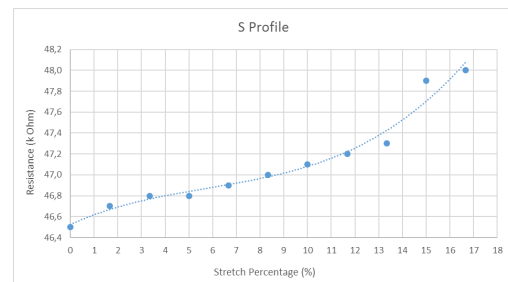
The graph shows that the resistance of the specimens increased as the stretch percentage increased for all thicknesses. This means that there was a direct proportionality between the stretch percentage and the resistance for honeycomb-shaped profiles. The effect of thickness on the resistance change was also evident, as thicker specimens showed higher resistance sensitivity than thinner ones. Therefore, the resistance and the thickness of honeycomb profiles had a direct proportionality as well. Tensile test graphs of rectangular, "Z" shaped, and "S" shaped profiles were given in Figures 12, 13, and 14, respectively.



**Figure 12.** Tensile Test Results Graph for Rectangular Profile.



**Figure 13.** Tensile Test Results Graph for "Z" Shaped Profile.



**Figure 14.** Tensile Test Results Graph for "S" Shaped Profile.

$$\rho = \frac{(R \times A)}{L} \quad (1)$$

The results show how the resistance of 3D-printed conductive flexible materials varies depending on their shape, thickness, bending angle, and stretch percentage. The results are based on bending and tensile tests performed on different geometries of 3D-printed materials using a conductive flexible filament and a silicone-based mixture. The trendlines are derived from Equation (1). The resistivity ( $\rho$ ) formula shown in Equation 1 is obtained by multiplying resistance (R) with area (A), which is divided by length (L). The area remains constant while stretching due to the relationship between increasing length and decreasing width. Since resistivity should be constant for material, resistance increases with increasing stretch due to an increase in length.

The main findings of the study can be summarized as:

- The resistance is inversely proportional to the thickness for all shapes. This can be explained by the resistivity formula, which states that resistivity equals area times resistance divided by length. Since resistivity is constant for a given material, increasing the area (by increasing the thickness) decreases the resistance. Besides, the relationship between thickness and resistance is found to be the same as in the article of Flowers et al.[13].

- The stretch percentage is directly proportional to the resistance for all shapes except for straight-line profiles. This can be explained by the fact that stretching the material increases its length and decreases its thickness, which both increase the resistance according to the resistivity formula.

- The bending angle is directly proportional to the resistance for "S," "Z," and rectangular shapes and inversely proportional to the resistance for honeycomb and straight-line profiles. This can be explained by the change in the cross-sectional area of the specimens under bending stress. While the ratio of area divided by length (A/L) for "S," "Z," and rectangular shapes decreases with bending, the same ratio increases for honeycomb and straight-line profiles because of their inner structural differences.

- The honeycomb profiles show the most linear relationship between resistance and bending angle or stretch percentage among all shapes. This makes them suitable for 3D-printed soft conductive sensors, as linearity is desirable for sensitivity and accuracy.

These results provide valuable insights into the behavior of 3D-printed conductive flexible materials under different loading conditions. The results can be used to design and develop adaptive and responsive devices for various industries, such as soft robotics, biomedical devices, wearable sensors, and soft actuators. The results also suggest possible directions for future research, such as testing different materials, printing parameters, shapes, and thicknesses, as well as improving the insulation quality and method of the test setups.

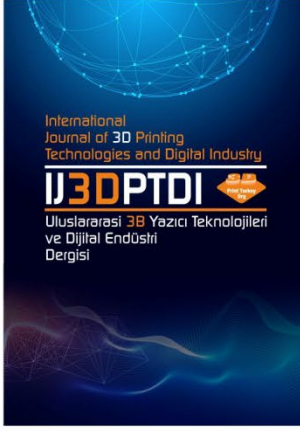
#### 4. CONCLUSION

In this study, different shapes with various thickness combinations were examined in two different test setups. The experimental data revealed the effects of thickness, stretch percentage, and bending angle on the resistance of 3D-printed conductive flexible materials. The resistance was found to be inversely proportional to the thickness for all shapes. The stretch percentage was found to be directly proportional to the resistance for all shapes except for straight-line profiles, while the bending angle was found to be directly proportional to the resistance for "S," "Z," and rectangular shapes, and inversely proportional to the resistance for honeycomb and straight-line profile. The honeycomb profiles were observed as the most linear ones in the result graphs, and thus they were selected and recommended as the most suitable shape for 3D-printed soft conductive sensors. The findings of this study contribute to the field of 3D printing and conductive flexible materials and open up new possibilities for designing and developing adaptive and responsive devices for various industries.

#### REFERENCES

1. Yasa, O et al., "An Overview of Soft Robotics", Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, Vol. 6, Pages 1-29, 2023.
2. Rus, D. and Tolley, M. T., "Design, fabrication, and control of soft robots", Nature, Vol. 521, Issue 7553, Pages 467-475, 2015.

3. Majidi, C., "Soft-Matter engineering for soft robotics", *Adv. Mater. Technol.*, Vol.4 Issue 2, Page 1800477, 2018.
4. Ze, Q., Wu, S. et al. "Soft robotic origami crawler." *Science advances* Vol. 8, Issue13 pages eabm7834, 2022.
5. Wallin, T. J. J., Pikul, J. and Shepherd, R. F., "3D printing of soft robotic systems", *Nat. Rev. Mater.*, Vol. 3, Issue 6, Pages 84-100, 2018.
6. Yazici, M. V., Kahveci, A., Kiziltas, F. S., Mulayim, N., and Gezgin, E., "Design and Development of a Surgical Robotic Hand with Hybrid Structure", 2018 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO), Magusa: IEEE, Pages 1-4, 2018.
7. Appiah, C., Arndt, C., Siemsen, K., Heitmann, A., Staubitz, A., and Selhuber-Unkel, C., "Living Materials Herald a New Era in Soft Robotics", *Adv. Mater.*, Vol. 31, Issue 36, Page 1807747, 2019.
8. Stoyanov, H., Kollosche, H. M., Risse, S., Waché, R., and Kofod, G., "Soft conductive elastomer materials for stretchable electronics and voltage controlled artificial muscles", *Adv. Mater.*, Vol. 25, Issue 4, Pages 578-583, 2013.
9. Kwok, S. W., Goh, K. H. H., Tan, Z. D., Tan, S. T. M., Tjiu, W. W., Soh, J. Y., and Goh, K. E. J. "Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors", *Applied Materials Today*, Vol. 9, Pages 167-175, 2017.
10. Kim, S., Kim, S., Majditehran, H., Patel, DK., Majidi, C., and Bergbreiter, S., "Electromechanical Characterization of 3D Printable Conductive Elastomer for Soft Robotics" 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, 2020..
11. Hwang, Y., Paydar, O. H., and Candler, R. N., "Pneumatic microfinger with balloon fins for linear motion using 3D printed molds", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 234, Pages 65-71, 2015.
12. Selvi, Ö., Telli, İ., Totuk, H. O., and Mistikoğlu, S., "3D printing soft robots using low-cost consumer 3D printers", 2019.
13. Flowers, P. F., Reyes, C., Ye, S., Kim, M. J., and Wiley, B. J., "3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament", *Additive Manufacturing*, Vol. 18, Pages 156-163, 2017.
14. Tang, L., Wu, S., Qu, J., Gong, L., and Tang, J., "A review of conductive hydrogel used in flexible strain sensor", *Materials*, Vol. 13, Issue 18, p. 3947, 2020.
15. Vignali, E., Gasparotti, E., Capellini, K., Fanni, B. M., Landini, L., Positano, V., and Celi, S. "Modeling biomechanical interaction between soft tissue and soft robotic instruments: importance of constitutive anisotropic hyperelastic formulations", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 40, Issue 1, Pages 224-235, 2021.
16. Selvi, Ö., Totuk O. H., Mistikoğlu S., and Arslan O., "Strengthening effect of flooding in 3d printed porous soft robotics scaffolds", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 5, Issue 2, Pages 293-301, 2021.
17. Muth, J. T., Vogt, D. M., Truby, R. L., Mengüç, Y., Kolesky, D. B., Wood, R. J., and Lewis, J. A. "Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers", *Adv. Mater.*, Vol. 26, Issue 36, Pages 6307-6312, 2014.
18. Lo, C. Y., Zhao, Y., Kim, C., Alsaïd, Y., Khodambashi, R., Peet, M., and He, X. "Highly stretchable self-sensing actuator based on conductive photothermally-responsive hydrogel", *Materials Today*, Vol. 50, Pages 35-43, 2021.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# CONCEPT DESIGN FOR OPTIMIZING MASS PRODUCTION PROCESSES WITH 3D PRINTER IN THE INDUSTRY

Yazarlar (Authors): Özge Villi , Osman Villi , Hakan Yavuz 

*Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Villi Ö., Villi Ö., Yavuz H., "Concept Design for Optimizing Mass Production Processes with 3D Printer in the Industry" Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 8(1): 8-19, (2024).*

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1359048

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# CONCEPT DESIGN FOR OPTIMIZING MASS PRODUCTION PROCESSES WITH 3D PRINTER IN THE INDUSTRY

Özge Villi<sup>a</sup> , Osman Villi<sup>b</sup> , Hakan Yavuz<sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Toros University, Vocational School, Electronics and Automation Department, Mersin, TURKEY

<sup>b</sup>Toros University, Vocational School, Computer Technologies Department, Mersin, TURKEY

<sup>c</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, Adana, TURKEY

\* Corresponding Author: [ozge.villi@toros.edu.tr](mailto:ozge.villi@toros.edu.tr)

(Geliş/Received: 12.09.23; Düzeltilme/Revised: 19.01.24; Kabul/Accepted: 22.01.24)

---

## ABSTRACT

This study deals with the conceptual design of three-dimensional (3D) printer technology for process optimization in industrial production. While initially 3D printers were primarily used for rapid prototyping, advancements in technology have transformed them into a new technology for mass production. Within the scope of this study, firstly, investigations were conducted on how Industry 4.0 technologies (internet of things (IoT), smart factories) are utilized on the production line. The first-in, first-out (FIFO) method, which is used in communication between objects (3D printer, industrial robot arm, conveyor belt, and assembly unit), has been elaborated in detail. The aim of this study is to comprehensively address and convey how Industry 4.0 technologies increase production speed and efficiency in mass production processes through the created conceptual design. In the obtained conceptual design, even though the production line has been kept limited, every stage of the production process has been thoroughly explained and examined from start to finish. Within the scope of the study, sample data of the production stages are presented with the sample software called 3D Production and Automation Software (3D MAS), which was developed using the C# programming language on Microsoft Visual Studio Community 2022 IDE. In the next study, efforts can be directed towards expanding the limited production line presented in this work, introducing other Industry 4.0 technologies, and incorporating them into the conceptual design of the production process.

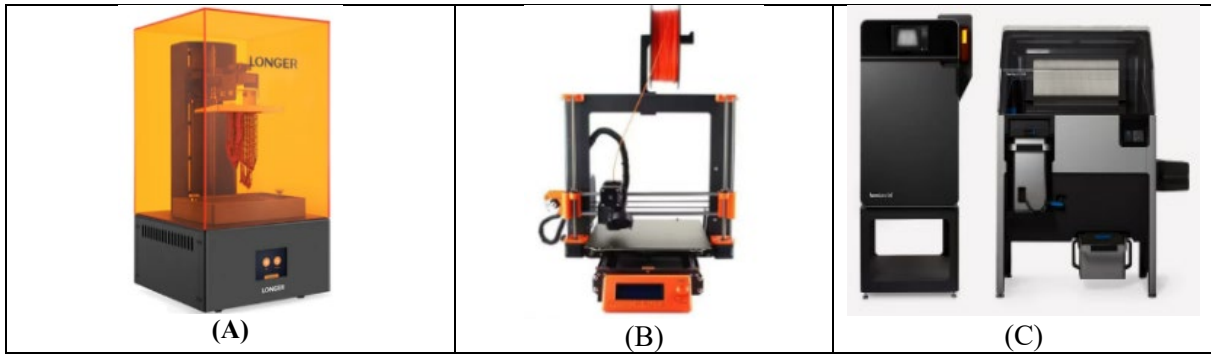
**Keywords:** 3D Printer, Internet of Things (IoT), Concept Design, Industry 4.0, Smart Factories.

---

## 1. INTRODUCTION

Three-dimensional (3D) printers operate on the principle of additive manufacturing, where objects are created by adding layers, utilizing various materials such as metal, plastic, composites, and organics, based on digital data. The 3D printing technology, first emerged in the 1980s with Stereolithography (SL) technology developed by the company 3D Systems. During that time, various layering manufacturing methods were developed, leading to patent applications. Subsequently, these developed technologies were commercialized by the

respective companies. Following SL, in the early 1990s, various other 3D printing methods were developed and brought to the commercial market by different companies. These methods include Laminated Object Manufacturing (LOM) by Helysis, Fused Deposition Modeling (FDM) by Stratasys, Selective Laser Sintering (SLS) by DTM, Direct Metal Laser Sintering (DMLS) by EOS, Solid Ground Curing (SGC) by Cubital, and Three Dimensional Printing (3BP) by Soligen [1]. Figure 1 displays visuals related to some of the 3D printing technologies.

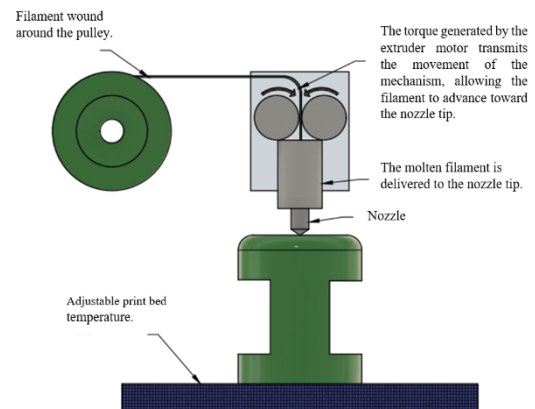


**Figure 1.** Three-dimensional printing technologies (A: SL, B: FDM, C: SLS).

The SLS (Selective Laser Sintering) technology is fundamentally based on the principle of melting powdered material using a carbon dioxide laser beam. In practice, the material is first heated to its melting point. Then, a laser beam fuses the powdered materials at specific positions for each layer as specified in the design. [2]. The SL (Stereolithography) method is based on the principle of photopolymerization of photosensitive resin materials when exposed to UV light. The SLA manufacturing method consists of a resin bath, a laser source with specialized hardware and software, and a platform used for the immersion process into the resin bath. After scanning the resin surface with a laser beam, the first layer is created. Then, the platform is submerged again into the resin bath at a distance equal to the layer thickness, and another layer is formed, connecting to the previous one [3]. In LOM (Laminated Object Manufacturing) technology, materials are cut into layers using a mechanical cutter and laser, then they are brought together using a lamination method. Pre-shaped layers can be used in lamination, or the printing model can be shaped after the process [4]. The SGC (Solid Ground Curing) method is based on photosensitive polymer and employs a powerful UV lamp or laser source to create the geometry of each layer [3-5]. In the 3BP (Three Dimensional Printing) method, a powder-based material is deposited layer by layer onto the printing surface. Then, a liquid adhesive delivered onto the powder particles through an inkjet print head allows the particles to come together, thereby forming the layers corresponding to the part geometry [6].

The FDM (Fused Deposition Modeling) technology is a method among additive manufacturing techniques that was developed in the 1980s and it is widely used by many industries [7]. In this technology, a filament

made of thermoplastic material is used. This filament is wound onto a spool in wire form, then a drive gear turns and moves the filament towards a heated chamber, where it melts. As a result, the molten filament is conveyed from the nozzle tip in the print head to the print bed. According to the gcode information obtained based on the CAD file of the print model and the slicing program, the print head moves. This allows the molten filament to create the layers and produce the 3D printed model. Figure 2 a schematic diagram shows the working principle of FDM 3D printers.

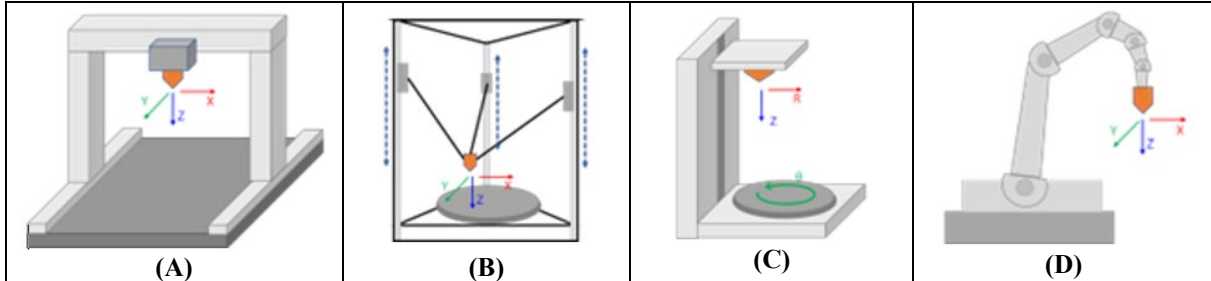


**Figure 2.** Schematic diagram of an FDM 3D printer.

FDM 3D printers are categorized into four different types: Cartesian, polar, delta, and robotic arm, based on structural configuration changes. In Cartesian FDM 3D printers, linear connections enable movement along the x, y, and z axes. The print bed can move along the z-axis, while the print head can move along the x and y axes. Various configurations are available where the print bed can move along the y-axis, while the print head moves along the x and z axes. In Polar FDM printers, while the print head moves linearly along the x and y axes, the

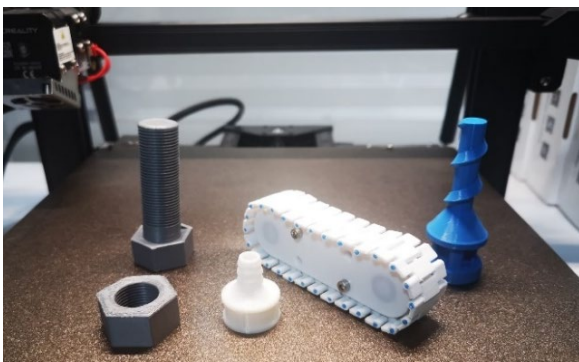
print bed rotates around the z-axis. Delta FDM 3D printers have three arms on the print head that can move in all directions. In robotic-arm-based FDM 3D printers, the print head is located at the end of a robotic arm. The position and orientation of the print head are determined

by the configuration of the robotic arm [8]. Figure 3 illustrates the classification of different types of FDM 3D printers.



**Figure 3.** Classification of FDM-type printers (A: Cartesian, B: Delta, C: Polar, D: Robotic Arm) [9].

The principle of layer-by-layer manufacturing, which is the production principle of 3D printers, is the reverse of subtractive manufacturing. In CNC turning and milling machines, parts are cut and removed from a material block by the method of removing chips to obtain the final product. In the layer-by-layer manufacturing method, the designed 3D object is obtained by combining the material layers successively created by the printer. This eliminates the waste materials generated in subtractive manufacturing methods and prevents material losses. In this way, the same final product is obtained using less material. Figure 4 shows images of sample prints obtained using 3D printing technology.



**Figure 4.** Sample prints obtained using 3D printing technology.

Additionally, due to the manufacturing method, 3D printing eliminates the need for mold design and production that might be required in traditional methods, as the digital data of the product is used to create the 3D print. The

reduction in material waste, the elimination of additional production stages such as mold

design and production, and the ability to start production immediately after the design are some of the reasons why 3D printing technology is preferred. Additionally, it allows incoming orders to be sent to the 3D printer, and production can take place rapidly without the need for any molds or assembly lines.

The ability to change the production line without the need for additional processes like tool changes or mold design, which are typically required in traditional manufacturing methods, enhances the efficiency and cost-effectiveness of 3D printer technologies in terms of time and cost. Furthermore, it provides another advantage by enabling cloud-based production, which is one of the Industry 4.0 technologies. When we consider 3D printers within the scope of Industry 4.0 technologies, it becomes evident that they hold a significant place in Industry 4.0, especially when combined with technologies such as cloud technology, the internet of things (IoT), sensors, wireless communication, and industrial robot arms [1]. While 3D printing technologies offer many advantages, the strength of the print depends on the print settings. Therefore, to achieve the desired strength values for the final product, the print parameters need to be appropriately adjusted [10]. Figure 5 illustrates the stages of product formation in 3D printers.



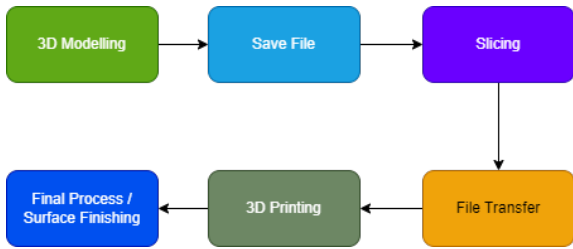


Figure 5. 3D printer product creation stages [1].

**1.1. Development of Industrial Revolutions and Industry 4.0**

Throughout history, there have been three Industrial Revolutions in industry. The First Industrial Revolution (Industry 1.0) began with the invention of the steam engine in the 18th century, aiming to increase production. Industry 2.0, at the beginning of the 20th century, facilitated the transition to mass production by using electrical energy. Industry 3.0 marked a period when production systems in industry shifted from analog to digital systems. Through these developments, the first three Industrial Revolutions introduced mechanization, electricity, and information technology (IT) into

human production processes to enhance productivity. However, merely increasing efficiency was not sufficient for companies to stand out in global competition. Companies have needed innovative approaches that allow information transfer throughout the entire lifecycle from production to supply, along with the rapid adaptation of virtual and physical structures. This has become essential for them to excel. With the removal of trade barriers between countries following the end of the Cold War, commercial exchanges among these countries have increased. In the 2000s, changing customer expectations for products have led to greater complexity in companies' production methods. In this context, the need for interdisciplinary collaboration by companies has led to the emergence of Industry 4.0, where objects communicate and interact over the internet, as a response. The development of industrial revolutions is illustrated in Figure 6 [11].

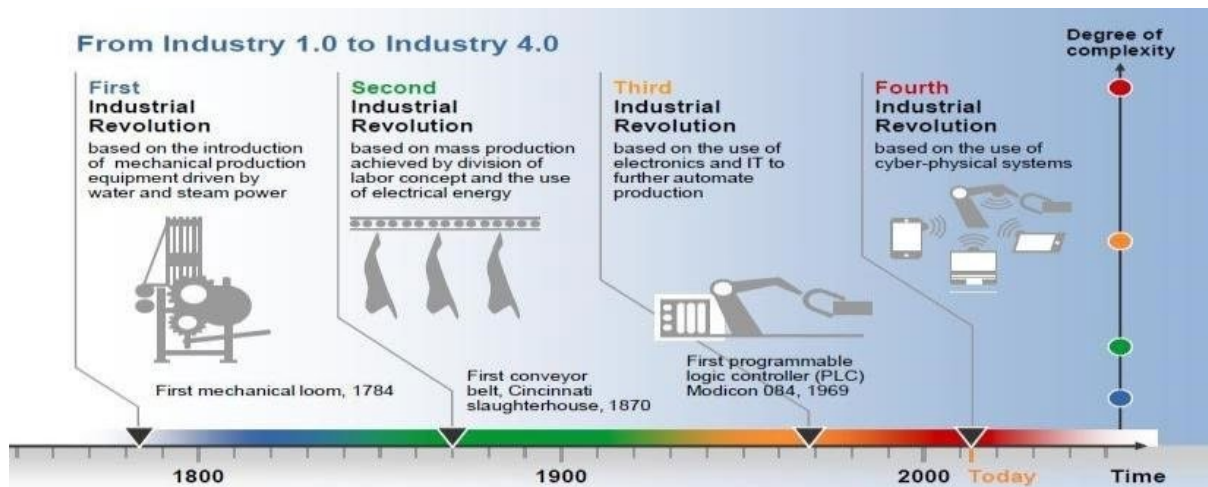


Figure 6. The progression of industrial revolutions [11].

The structure of Industry 4.0 is fundamentally altering the dynamics of production and consumption. This new approach, characterized by production systems that adapt to changing consumer needs, has brought about automation

systems that communicate and coordinate continuously with each other. As a result, it encourages close collaboration among various disciplines in the product development phase [12].

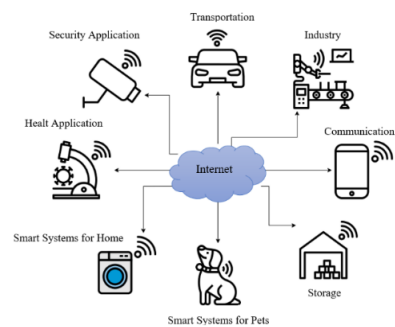
**Table 1.** Structure of Industry 4.0 [13].

Field	Sector	Applications
Technologies	Core Technologies	Internet of Things, Artificial Intelligence, Cloud Systems, Big Data, Robots, and 5G Communication
	Base Technologies	Data Security, Sensors, New Materials, Genomic Technologies
Applications	Products	Wearable, Synthetic, and Biological Products.
	Smart Systems	Smart Cars, Smart Factories, Smart Security Systems, Smart Defense Systems, Smart Energy Systems
Institutions	Legal Framework	Data Regulations, Testing and Certification, Guidelines for Smart Applications

In Table 1, it is stated that the structure of Industry 4.0 consists of three elements: technologies, applications, and supporting institutions, and that these elements can change according to the expectations of stakeholders. [13-14]. In this context, the technologies involved in the 4th Industrial Revolution are divided into core and base technologies. Additionally, applications, products, and smart systems are considered, and supporting institutions are also part of this structure [14-15].

**1.2. Industry 4.0 Technologies**

Many of the highly developed countries have invested in obtaining advanced mass production systems rather than conventional production. The majority of this investment has been made to create smart factories using 4th Industrial Revolution technologies. For example, in the first dark factory known as a smart factory in operation in China, mobile phone modules are produced using "smart" technologies where objects communicate with each other, and the use of human labor has been eliminated. As a result, the number of workers has been reduced by 90%, and the defect rate has dropped from 25% to 5%. The structures that enable objects to communicate and interact with each other are referred to as the IoT. From a technical perspective, IoT encompasses physical entities that include embedded systems, along with electrical, mechanical, computer, and communication mechanisms, enabling internet-based communication and data exchange. Some examples of industrial IoT applications are shown in Figure 7 [12].



**Figure 7.** Use cases of the Internet of Things (IoT) [12].

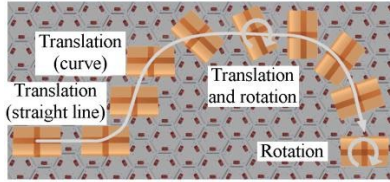
Cloud-based Manufacturing (CBM), another Industry 4.0 technology, allows for increased efficiency, reduced product costs, and optimized raw material procurement to meet changing customer demands. Based on a network-connected production model, reconfigurable cyber-physical production lines can be created on-demand. The benefits provided by this technology include scalability, accessibility from anywhere, and virtualization. [12].

**1.3. Omnidirectional Cellular Conveyor**

Conventional conveyor belts allow objects to move only in a straight line. In order for the object to perform turning, sorting, and singulation movements, the conveyor belt system requires the addition of mechanical components and modules.

An omnidirectional cellular conveyor, unlike a traditional conveyor, can move materials in any direction. They are widely used in various industries, including manufacturing, logistics, and packaging. These conveyors feature small individual cells or compartments that provide greater flexibility and precision in material handling. The movement of objects in different

directions is controlled solely by software. Changes in the control software alter the material flow task [16]. In Figure 8, the trajectory of objects on an omnidirectional cellular conveyor is depicted [17].



**Figure 8.** The trajectory of objects on an omnidirectional cellular conveyor [17].

## 2. LITERATURE REVIEW

In the literature, there are studies related to process optimization in mass production. For example, Doğan and Takcı (2015) conducted a process improvement study using simulation in a textile company. The study was conducted in a textile factory located in the Kayseri province. In this study, the aim was to efficiently utilize resources such as materials and equipment to achieve the desired capacity [18]. Aljinović et al. (2022) conducted a study aimed at optimizing and improving the assembly line of manually produced gearbox production through the utilization of Industry 4.0 technologies [19]. Gül and Toptaş (2021) conducted a study on the optimization and effects of automation systems in the design processes. In the study, the effects of physical and parametric changes on the production process were investigated through an automation line that caps bottles of different sizes. The example production system they designed resulted in a 30% improvement in cycle time and design time in the production process [20]. Herbuś and Ociepka (2017) utilized the mechatronic concept designer module of PLM Siemens NX to perform virtual commissioning in a production line. Their work aimed at achieving cost and time efficiency in the commissioning process and reducing time-to-market [21]. In Parlar's (2022) study, a concept design was developed for a specialized machine that transports spherical materials resembling balls from one hopper to another at a specified distance. The research introduced the possibility of conveying granular materials not only through mechanical methods such as belts, screws, and buckets but also utilizing pneumatic and hydraulic systems. [22].

When considering commercially available products, the Creality CR-30 3D PrintMill,

depicted in Figure 9, is the first 3D printer designed theoretically for infinite-length printing and batch production [23]. With the capability of continuous infinite printing, it offers time and cost savings. Completed prints advance on a heated conveyor belt and detach automatically from the belt. Therefore, there's no need to clean and restart the print bed every time.



**Figure 9.** Creality CR-30 3D PrintMill conveyor 3D printer [23].

## 3. MATERIAL VE METHOD

In this study, a conceptual design for 3D printer technology in mass production process optimization has been realized. The design was completed using the computer software Autodesk Fusion360, which is a 3D solid modeling program with a free individual educational license. When positioning the 3D printers on the factory production line, it was considered that they should be advantageous for mass production. Furthermore, during the expansion of the production line, it was planned to have the maximum number of 3D printers and an adequate number of robotic arms that would fit within the unit area. Industrial robotic arms were placed on the production line to transfer the products produced by 3D printers onto the conveyor belt. During the placement of industrial robotic arms, ensuring access to the prints produced by 3D printers around the robotic arm was taken into consideration. As the completed prints needed to be directed to different assembly units, the number of conveyor belts on the production line was increased. Prints produced by 3D printers are initially picked up by the robotic arm and placed on the omnidirectional cellular conveyor belt. From the omnidirectional cellular belt, they are transferred to the conveyor belt of the respective assembly unit. An algorithm was created to meet the design requirements, and the details are shown in Figure 10.

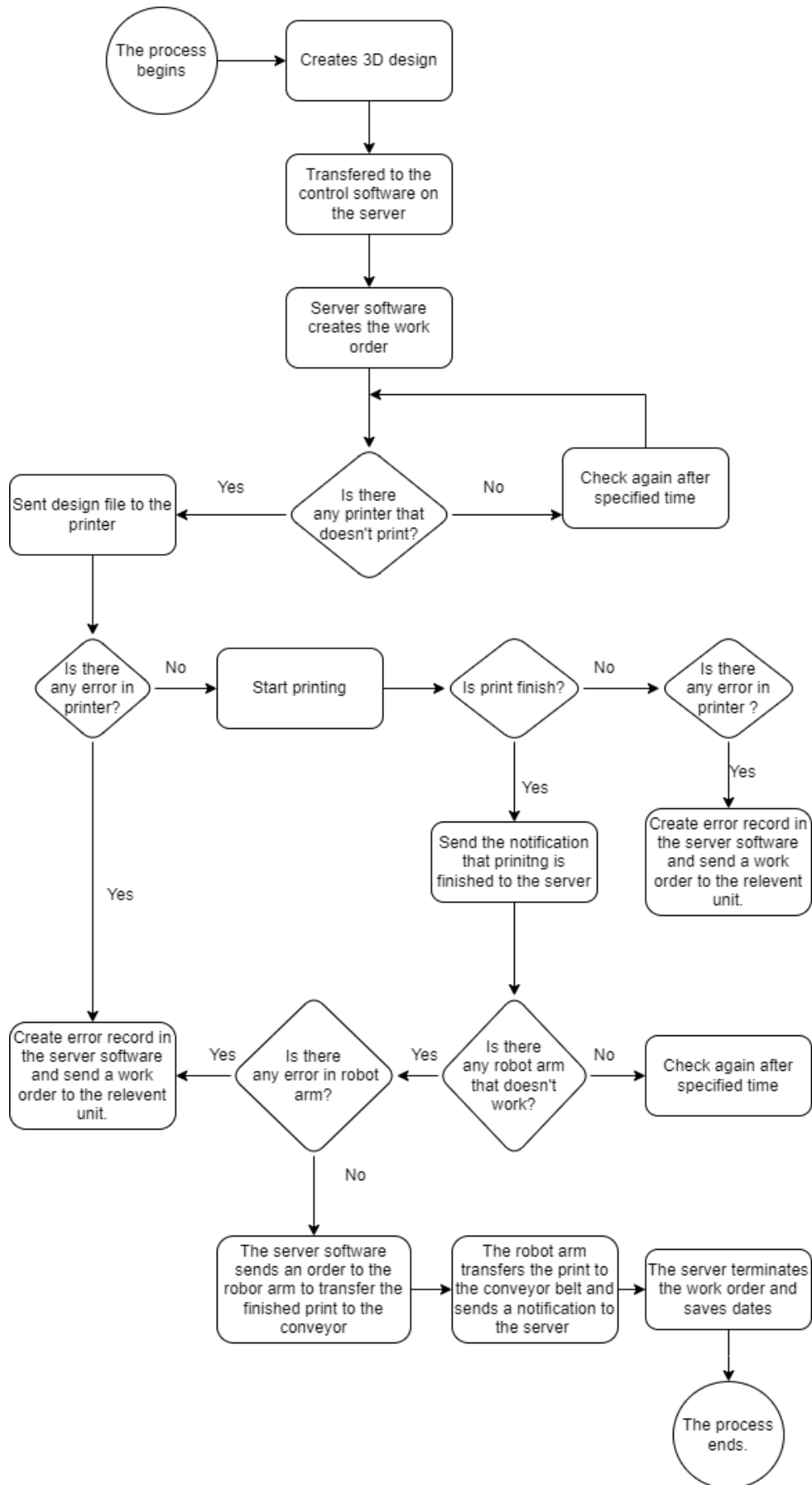


Figure 10. Algorithm Created to Meet Design Requirements.

The workflow in the conceptual factory design is as follows: Firstly, the three-dimensional design and slicing processes of the customer's request are carried out by the product development unit. The created work piece is then added to the production queue. According to the First in, First Out (FIFO) method, task assignment signals are sent to the 3D printers via IoT modules. The server transmits the print start signal to the available 3D printer according to the FIFO method. Once the printing process begins, the printer sends a "in progress" signal to the server. The server records this information in the database. In the event of an error (such as filament sensor failure, heat bed sensor is failure, stepper motor failure, level calibration error, robotic arm motion sensor error, electrical issue, filament depletion, out of filament (filament finished), filament replacement, nozzle clogging, layer defects, nozzle overheating, mainboard overheating, fan failure, connection error, sticking error, camera error and support error), error message codes are transmitted from the 3D printer to the server along with an "error" signal. In addition, if there is a need for a change in filament type during printing, the corresponding error code is generated, and a work order is sent to the relevant department. In the event of a filament change or the occurrence of any of the errors mentioned above, the server automatically generates a work order, communicates the error code to the maintenance department, and disables the respective printer. In the database, the printer status, which was previously marked as "in progress," is updated to "error," and the relevant error code is added. The server reassigns the unfinished job to another "available" printer. Once printing starts without errors, the 3D printer sends the "in progress" signal to the server. During printing, at intervals specified by the operator, photo and video data are transferred to the server, and potential print errors unrelated to the printer are analyzed. In case of any printing error, information is sent to the server and the operator, along with the error code. When the printing process is completed, relevant data about the print (such as printing time, filament usage, location information, photos, videos, etc.) is transmitted to the server, and this data is recorded in the completed jobs table. After the server records the data, the job status on the printer is updated to "done." When the design is sent to the printer, concurrently, if

support material is expected to form on the printed model, a work order is dispatched to the relevant department for the removal of supports. Following the completion of the print transportation process with the robot arm, the printer's operational status is updated to "available." Once the printer's job status is "done," the ID or location information signals of the completed task are transmitted from the server to the robotic arm. The robotic arm picks up the print from the printer's bed and initiates the transfer process to the multi-cellular conveyor belt. In the event of any errors, similar to the 3D printer, error signals are transmitted to the server and the malfunction unit. The server transmits the information of the 3D printer in the "done" status to the available robot arm. The robot arm takes the print and transfers it to the multi-cellular conveyor belt. The multi-cellular conveyor belt transfers the print to the conveyor belt of the unit defined in the job order.

The interface of the sample software called 3D Manufacturing and Automation Software (3D MAS), developed using the C# programming language in Microsoft Visual Studio Community 2022 IDE within the scope of the study, is shown in Figure 11.

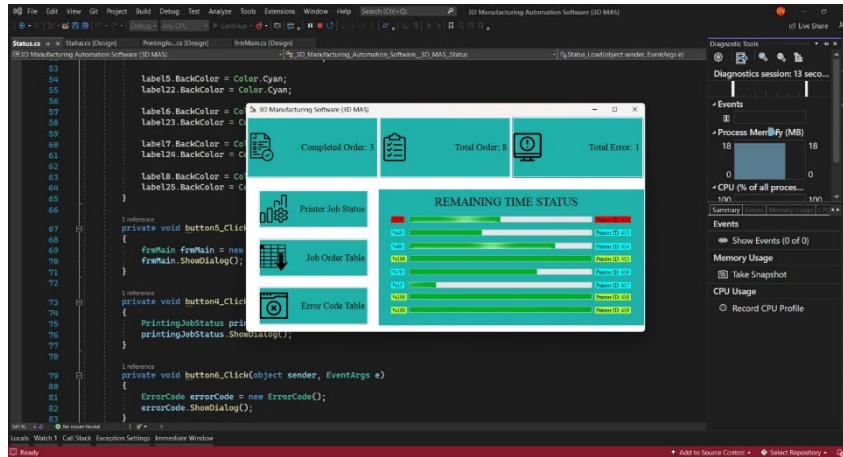


Figure 11. 3D Manufacturing and Automation software interface (3D MAS).

The operator can instantly view completed orders, the total number of orders, and the number of errors in real-time. Access to the real-time status information of job orders can be obtained through the 'Printer Job Status' button.

The table displayed in the window that opens when the button is clicked is shown in Figure 12.

Job Order Number	Date	Time	Design File	Customer Number	Due Date	Material Type	Print Size	Print Weight	Printing Time (hour)	Approximate Cost	Assembly Unit ID
1	01.01.2023	09:00:10	C:/.../2.gcode	1	01.01.2023	PLA	30x10x5	80	9	150	230
2	01.01.2023	09:10:10	C:/.../3.gcode	2	01.01.2023	PLA	10x15x15	80	12	240	231
3	01.01.2023	09:20:45	C:/.../3.gcode	3	01.01.2023	ABS	25x25x20	140	20	300	232
4	01.01.2023	10:11:00	C:/.../4.gcode	4	01.01.2023	PCL	30x20x30	200	24	401	233
5	01.01.2023	10:30:36	C:/.../5.gcode	5	01.01.2023	PLA	25x25x25	145	23	310	234
6	01.01.2023	10:50:12	C:/.../6.gcode	6	01.01.2023	PLA	15x15x15	90	13	250	235
7	01.01.2023	11:10:05	C:/.../7.gcode	7	01.01.2023	ABS	30x30x30	180	22	320	236
8	01.01.2023	11:30:45	C:/.../8.gcode	8	01.01.2023	PCL	20x20x20	120	18	275	237

Figure 12. Printer Job Status.

The Remaining Time Status graph allows you to see the time printers spend during printing and the time required to complete the printing. In the event of a possible error in the printer, the printer ID information will be displayed in red. Figure 13 shows an image of the graphic.

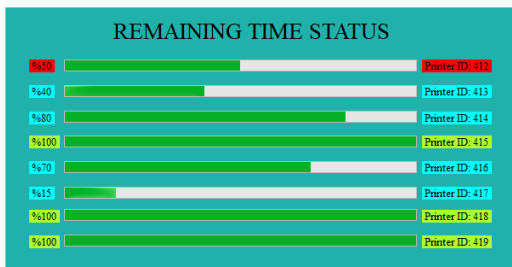


Figure 13. Remaining Time Status Graph.

The "Error Code Table" button on the interface allows access to detailed information in the event of an error. In case of an error, the error code and description for the respective job order number are recorded in the sample error code table shown in Figure 14.

PRINTER ID	ERROR CODE	DESCRIPTION
412	230	Filament Sensor Not Working!

ERROR CODES	
230: Filament sensor is not working!	239: Nozzle clogged error!
231: Heated sensor is not working!	240: Layer defects!
232: X stepper is not working!	241: Nozzle overheated!
233: Y stepper is not working!	242: Mainboard overheated!
234: Z stepper is not working!	243: Fan is not working!
235: Level calibration error!	244: Connection error!
236: Robotic arm motion sensor not working!	245: Sticking error!
237: Electrical issue!	246: Camera error!
238: Out of filament!	247: Support error!
	248: Filament replacement!

Figure 14. Error Code Table.

#### 4. RESULTS

In this study, a conceptual design aimed at process optimization in mass production using 3D printing technology was executed in Autodesk Fusion360, a computer software with a free individual educational license for 3D solid modeling. The proposed 3D MAS software in this study was developed using the object-oriented programming language C# within the Microsoft Visual Studio Community 2022 environment. However, if needed, it can be developed with languages such as Java,

Python, C++, Swift. Additionally, it can be designed as a web-based application. Microsoft SQL Server database was utilized for storing application data and generating reports. Alternatively, MySQL, PostgreSQL, or Oracle databases can be used if required. The proposed system is designed to facilitate continuous mass production with the capability of immediate intervention in case of errors. This minimizes time and labor losses, consequently leading to a reduction in unit costs. When designing the placement of 3D printers, the honeycomb design of beehives was taken into consideration. The advantage of positioning in hexagonal sections is to partition an area in the most efficient way possible [24]. As a result, the aim was to utilize the space of a production facility in the most efficient manner. Figure 15 illustrates the designed production line, with the fundamental components of the production line being numbered.

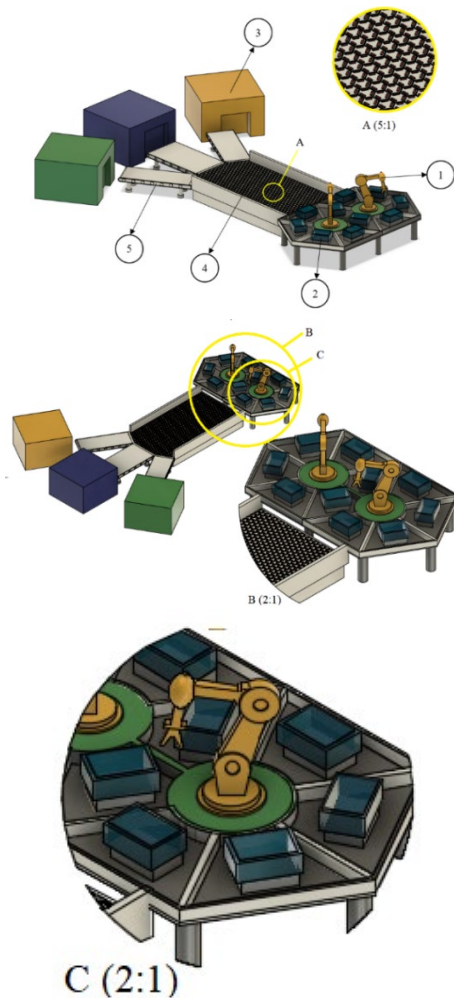


Figure 15. The Designed Production Line.

Corresponding expressions for these numbers are provided in Table 2.

Table 2. Components of a Production Line.

Number	Description
1	Industrial Robotic Arm
2	3D Printer
3	Assembly Unit
4	Omnidirectional Cellular Conveyor Belt
5	Conveyor Belt

## 5. CONCLUSION

This study deals with the conceptual design for process optimization in mass production using 3D printing technology, which is set to revolutionize manufacturing methods in the industry with the advancement of technology. When examining the literature, it is observed that 3D printers are widely used in various fields. However, examples where printers are used within an automation system and production processes are automated are limited. This study focuses on the designs of 3D printers that are integrated with each other and utilize Industry 4.0 technologies. Industrial robot arms and versatile cellular conveyor belts have been employed in the production stages. Through a central computer software, all processes can be monitored, and real-time tasks can be defined. Additionally, maintenance and repair mechanisms have been incorporated into the system for potential errors. This highlights the uniqueness of the proposed system. The creation of the conceptual model, the transfer of the obtained prints to a versatile cellular conveyor belt, and their transfer to relevant units are all considered with the integration of Industry 4.0 technologies such as IoT, cloud-based communication, and smart factory approaches to ensure the most functional continuation of the process. Additionally, this study enables faster and more functional production with the conceptual design model obtained using 3D printers in the industry.

In future studies, it is expected that research and conceptual designs aimed at improving the efficiency of 3D printers in mass production will be conducted. These studies are expected to involve analyses in various simulation software to obtain detailed data. It is expected that, as a result of these simulated and data-driven studies, more efficient and high-performance production facilities will be established.

Furthermore, machines that perform subtractive manufacturing alongside or in conjunction with 3D printers can also be integrated, and additional enhancements can be made to the conceptual design.

In this study, the emphasis has been placed on the conceptual design utilizing identical 3D printers. In our subsequent research, we plan to develop an approach incorporating different types of 3D printers, where an appropriate printer is automatically selected by a deep learning-based control software. This will enable the system to make the selection of the most suitable printer and filament type based on design parameters.

### ACKNOWLEDGMENT

In the scope of this study, I would like to extend my thanks to Prof. Dr. Hakan Yavuz and Lecturer Osman Villi for their support and contributions. I also express my gratitude to my daughter Eliz, who has been my source of motivation.

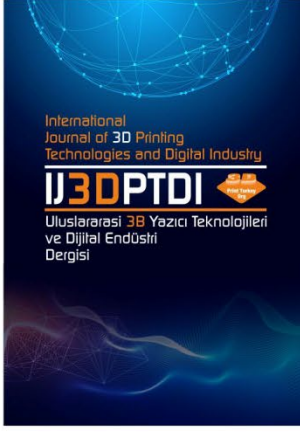
This study was presented as an abstract paper at the 3rd International Congress on Scientific Researches (Ases).

### REFERENCES

- Sürmen, H. K., "Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Vol.24, Issue 2, Pages 373-392, 2019.
- Wong, K. V. and Hernandez, A., "A review of additive manufacturing", International scholarly research notices, 2012.
- Bikas, H., Stavropoulos, P. and Chryssolouris, G., Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol. 83, Pages 389-405, 2016.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. and Hui, D., "Additive Manufacturing (3D printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges", Composites Part B: Engineering, Vol.143, Pages 172-196, 2018.
- Gebhardt, I. A., Rapid prototyping: industrial rapid prototyping system: prototyper: solid ground curing. Cubital: Ra'anana, Israel, 105-109, 2003.
- Jadhav, T. R., Kamble, N. K. and Padave, P. R., "A Review on Additive Manufacturing for Bio-Implants", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 8, Issue 11, 2019.
- Villi, Ö., Villi, O. and Yavuz, H., "Concept Design for Optimizing Mass Production Processes with 3D Printer in the Industry", Ases III. International Scientific Research Conference, Pages 59-60, Trabzon, Turkey, 2023.
- Dhanunjayarao, B. N., Naidu, N. S., Kumar, R. S., Phaneendra, Y., Sateesh, B., Olajide, J. L. and Sadiku, E. R., "3D Printing of Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites: Additive Manufacturing", Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, Pages 1-29, 2020.
- Fabweaver, "Types of 3D Printing : FFF, Most Popular 3D Printer", <https://blog.fabweaver.com/3d-printing-method-fff-most-popular-3d-printer-0>, 2 June, 2022.
- Korkut, V. and Yavuz, H., "Enhancing the tensile properties with minimal mass variation by revealing the effects of parameters in fused filament fabrication process", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 42, Issue 10, Pages 525, 2020.
- Liang, S., Rajora, M., Liu, X., Yue, C., Zou, P. and Wang, L., "Intelligent manufacturing systems: a review", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 7, Issue 3, Pages 324-330, 2018.
- Yıldız, A., "Endüstri 4.0 ve Akıllı Fabrikalar", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Vol. 22, Issue 2, Pages 546-556, 2018.
- Moon, Y. and Seol, S. S., "Evaluation of the Theory of the 4 th Industrial Revolution", Asian Journal of Innovation & Policy, Vol. 6, Issue 3, 2017.
- Türkel, S. and Yeşilkuş, F., "Dijital Dönüşüm Paradigması: Endüstri 4.0.", Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, Vol. 7, Issue 5, Pages 332-346, 2020.
- Hwang, G., "Challenges for Innovative HRD in the Era of the 4th Industrial Revolution", Asian Journal of Innovation & Policy, Vol. 8, Issue 2.,2019.
- Krühn T, Falkenberg S. and Overmeyer L., "Decentralized control for small scaled conveyor modules with cellular automata", IEEE International Conference on Automation and Logistics, Pages 237-242, Hong Kong and Macau, 2010.



- 17.Uriarte, C., Asphandiar, A., Thamer, H., Benggolo, A. and Freitag, M., "Control strategies for small-scaled conveyor modules enabling highly flexible material flow systems", *Procedia CIRP*, Vol. 79, Pages 433-438, 2019.
- 18.Dogan, N. Ö. and Takci, E., "Process Improvement in a Textile Firm Using Simulation", *Ege Academic Review*, Vol. 15, Issue 2, Pages 185, 2015.
- 19.Gjeldum, N., Salah, B., Aljinovic, A. and Khan, S., "Utilization of Industry 4.0 related equipment in assembly line balancing procedure", *Processes*, Vol. 8, Issue 7, Pages 864, 2020.
20. Burak, G. Ü. L. and Toptaş, E., "Tasarım Süreçlerinde Otomasyon Sistemlerinin Optimizasyonu ve Etkilerinin İncelenmesi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Vol. 28, Pages 1534-1539, 2021.
- 21.Herbuś, K. and Ociepka, P., "Designing of a technological line in the context of controlling with the use of integration of the virtual controller with the mechatronics concept designer module of the PLM Siemens NX software", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Vol. 227, Issue 1, Pages 012057,2017.
- 22.Parlar, Z., "Conceptual Design Of A Transport Machine For Conveying Ball-Like Material", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Vol. 10, Issue 4, Pages 1243-1250, 2022.
- 23.İleri 3D, Creality CR-30 Print Mill Konveyörlü 3D Yazıcı, <https://www.ileri3d.com/urun/creality-cr-30-printmill-konveyorlu-3d-yazici>, March 1, 2023.
24. Hales, T. C., "The Honeycomb Conjecture", *Discrete & Computational Geometry*, Vol. 25, Pages 1-22, 2001.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## BEŞ EKSEN CNC SICAK TEL STRAFOR KESİM MAKİNESİ İMALATI

## MANUFACTURING FIVE AXIS CNC HOT WIRE STYROFOAM CUTTING MACHINE

**Yazarlar (Authors):** Onur CEYLAN<sup>ID\*</sup>, Ahmet KABUL<sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ceylan O., Kabul A., "Beş Eksen CNC Sıcak Tel Strafor Kesim Makinesi İmalatı" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 20-31, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1374711

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# BEŞ EKSEN CNC SICAK TEL STRAFOR KESİM MAKİNESİ İMALATI

Onur CEYLAN<sup>a</sup> , Ahmet KABUL<sup>a</sup> 

<sup>a</sup> Burdur Mehmet Akif Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [onurceylan15@gmail.com](mailto:onurceylan15@gmail.com)

(Geliş/Received: 11.10.23; Düzeltme/Revised: 29.12.23; Kabul/Accepted: 18.01.24)

## ÖZ

Bu çalışmada, beş eksen Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) sıcak tel straför kesme makinesinin tasarımı ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanacak makine için öncelikle piyasada bulunan straför kesme makineleri incelenmiş ve bu makinelerin eksiklerine göre yeni bir makine tasarlanmıştır. Straforun en kolay kesim yöntemi sıcak telli kesim yöntemidir. Sıcak tel straförün içerisinde ilerlerken straförü eritmektedir. Tasarlanan makine de sıcak teli kullanmaktadır. Makine imalatı sırasında telin ne kadar ısıtılacağı, hareket hızı, çentik genişliği gibi dikkat edilmesi gereken birtakım parametreler mevcuttur. Kesimin hatasız ve düzgün yapılabilmesi için bu parametrelere dikkat edilmelidir. Sıcaklığın ve hızın ayarlanması makine imalatındaki en temel etmendir. Makinenin sıcaklık ayarı doğru akım (DA) gerilim regülatörü ile hız ayarı ise Mach3 programıyla sağlanmaktadır. Piyasada kullanılan iki eksenli straför kesim makinelerinin en önemli eksiği, üç boyutlu (3D) ürünleri kesememeleridir. Geleneksel iki boyutlu ürün kesebilen makinelerin aksine, tasarlanan makine ürünleri 3D şekilde kesebilmektedir. Prototipi üretilen CNC makinenin kolları x ve y eksenlerini temsil etmektedir. Kolların bağımsız şekilde hareket edebilmesi makinenin dört eksenli gibi davranmasını sağlamaktadır. Makine tablasının üstüne yerleştirilen döner tabla sayesinde döner bir A eksenini de elde edilmiştir. Döner bir eksenin ilave edilmesiyle makine beş eksenli olarak da çalışabilmektedir. Makinenin gövdesi 3D yazıcıdan basılan parçalar, sigma profiller ve Orta Yoğunluktaki Lif Levha (MDF) tabladan oluşmaktadır. Hareket, vidalı mil ve kayış kasnak ile sağlanmaktadır. Makinede beş adet step motor ve motor sürücülerini kullanılmıştır. Makinenin kontrolü Mach3 kontrol kartı ile sağlanmaktadır. Makinenin köpüğü işleme ölçüleri 900 mmx900 mmx390 mm'dir. Makine ile ayarlanabilir tel sıcaklığında 0,3 mm nikrom tel ile 2 cm kalınlığında straför kesimi yapılabilmektedir. Tasarlanan makine hem döner tablalı hem de döner tabla olmadan kullanılabilir. Prototip üretimi yapılan makine ile konik kesim, yıldız-beşgen kesim, vazo kesim ve burgulu kesim çalışmaları başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** CNC Strafor Kesim, Sıcak Tel, Beş Eksen, Döner Tabla.

## MANUFACTURING FIVE AXIS CNC HOT WIRE STYROFOAM CUTTING MACHINE

### ABSTRACT

In this study, the design and prototype production of a five axis Computer Numerical Control (CNC) hot wire styrofoam cutting machine has been investigated. The styrofoam cutting machines which are available in the market has been investigated firstly. Then the proposed machine has been designed to overcome of the shortcomings of the existence machines. The easiest cutting method of styrofoam is the hot wire cutting method. If the hot wire moves through the styrofoam, the styrofoam will be melt. The proposed machine uses hot wire, too. The parameters such as; how much the wire should be warmed, the moving speed of wire, the width of the notch, should also be considered. In order to achieve accurate and smooth cutting process, these parameters should be set carefully. The fundamental manufacturing process of machine includes the adjustment of speed and temperature. While the temperature can be adjusted with a direct current (DA) voltage regulator, the speed can be adjusted by using Mach3

program. The most important disadvantage of two axis styrofoam cutting machines is the unavailability of three dimensional (3D) cutting. In contrast of two dimensional cutting machines, the proposed machine has an ability to cut 3D. Straight motion of the prototype CNC machine has been represented with x-axes and y-axes. The movement process has been achieved like four-axes by the regardless movement of two axes. A rotary table is mounted on the machine chasis to obtain rotational A-axis. By adding this rotational axis, the number of axes of the proposed CNC machine has been upgraded to five axes. The structure of the machine consists of materials which are produced in 3D printer, sigma profiles and Medium-Density Fiberboard (MDF) table. The movement has provided with the usage of ball screw and belt pulleys. Five step motors and their drivers have been used in the machine. The control of the machine has been provided with Mach3 control card. The dimensions of the processed styrofoam are  $900\text{ mm} \times 900\text{ mm} \times 390\text{ mm}$ . The machine is capable of cutting  $2\text{ cm}$  styrofoam with  $0.3\text{ mm}$  nichrome wire with adjustable temperature. The proposed machine can be operated both with a rotary table and without a rotary table. Conical, star-pentagon, vase and twisted cutting process has been applied successfully with the prototype machine.

**Keywords:** CNC Styrofoam Cutting, Hot Wire, Five Axis, Rotary Table.

## 1. GİRİŞ

Bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) makineleri farklı imalat sektörlerinde torna, freze, delme, taşlama, kesme, vb. operasyonel işlemleri yerine getirmek amacıyla yaygın olarak tercih edilen endüstrinin ana makineleridir [1-2]. CNC makinelerin temeli 1940'lı yıllarda üretilen Nümerik Kontrol (NC) makinelerine kadar dayanmaktadır. Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak çok değişik tipte ve özellikle CNC makineleri kullanılmaktadır [3-4].

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan CNC makineleri iki veya üç eksenlidir [5]. İki eksenli CNC makineleri x-eksen ve y-eksen doğrultusunda hareket ederken; üç eksenli CNC makineleri x-eksen, y-eksen ve z-eksen doğrultusunda hareket edebilmektedir. Gelişen bilgisayar, elektronik ve kontrol sistemlerinin yardımıyla üç lineer eksene ek olarak iki döner eksen de günümüz CNC makinelerinde tercih edilmektedir [6]. Gün vd., üç sabit ve iki döner eksene sahip beş eksenli beşik sistemli CNC freze tezgâhı üretimi yapmışlardır. Ürettikleri makine x, y ve z-eksenlerinde sırasıyla  $400\text{ mm}$ ,  $400\text{ mm}$  ve  $120\text{ mm}$  çalışma alanına sahip olup Mach3 kontrol programı ile çalıştırılmıştır [7]. Taşınabilir boyutlarda CNC freze makinesi üretimi alanında çalışan Bakar vd.,  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  ölçülerinde mini bir CNC freze makinesi tasarlamışlardır. Metal parçalarını yüksek hızlarda işleyebilme kapasitesine sahip CNC makinesinin eksenleri açık kaynak geometrik kodlar (G-kodları) ile

kontrol edilmiştir [8]. Rahman vd., x, y ve z-eksenlerinde sırasıyla  $400\text{ mm}$ ,  $300\text{ mm}$  ve  $200\text{ mm}$  çalışma alanına sahip üç eksenli bir CNC freze makinesi tasarlamışlardır. Çalışmalarında Mach3 kontrol kartı ile CNC makinenin eksen hareketleri kontrol edilmiştir. Üretilen makinenin endüstriyel uygulamalardan ziyade eğitim hedefli uygulamalar için kullanılması amaçlanmıştır [9].

Prototip CNC makine üretimi araştırma çalışmalarında mekanik tasarımın, matematiksel modellemenin ve yazılım algoritmasının bütünsel olarak geliştirildiği çalışmalar da mevcuttur. Kuncan vd., CNC tezgahlarındaki yazı ve desenlerin üç boyutlu karmaşık yüzeylere aktarılması için matematiksel dönüşüm algoritması gerçekleştirmişlerdir [10]. CNC makine üretimleri kadar CNC makinelerin kabiliyetlerini arttıracak çalışmalar da güncel çalışma konularındadır. Öztürk ve Kuncan, kameradan alınan gerçek zamanlı görüntüleri CNC tezgâhında işlemişlerdir. Görüntü işleme aşamasında MATLAB programı kullanılan çalışmada, G-kodları MATLAB üzerinde çalıştırılan bir komut dosyası ile elde edilmiştir. Üç eksen bir CNC makinesi yardımıyla kameradan alınan görüntüler başarılı bir şekilde işlenmiştir [11].

Strafor; kolay işlenebilen, ucuz ve hafif bir malzemedir. Strafor, tabelalarda ve ambalaj sanayisinde yalıtım ve dekorasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Strafor kesimi için de özelleşmiş CNC makineler vardır. Strafor

kesim makinelerinde akım taşıyan bir telin köpük içerisinde hareket etmesiyle, telin temas ettiği köpük buharlaşır. Bu işlem, kısmen köpük yüzeyini eritir ve kesim yerinde açık bir boşluk bırakır. Bu boşluğa çentik denir [12]. Abeysinghe vd. [13] yaptıkları çalışmada telin sıcaklığının ve besleme hızının çentik genişliğine etkisini incelemişlerdir. Mohammed ve Kadhum [14] kesimi etkileyen parametrelere straforun yoğunluğunu da katarak, parametrelerin kesim üzerindeki etkilerini yüzdesel olarak ortaya koymuşlardır. Elektromekanik bir model Petkov ve Hattel [15] tarafından 2016 yılında yaptıkları bir çalışmada önerilmiştir. Kullandıkları yöntemle telin gerilimini ve sıcaklığını tahmin etmişlerdir. Ek olarak yatay yönden ölçülen kesme açısı ile kesme genişliğini ilişkilendirmişlerdir.

Sıcak kesim makinelerinde nikrom teller farklı malzemeleri kesen CNC makinelerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Nikrom telin kesim sırasında eğilmesini önlemeye yönelik yapılan bir çalışmada Karmakar ve Subbiah, kesim malzemesi olarak Ekspande Polistren Köpük (EPS) malzemesini tercih etmişlerdir [16]. Memon vd., nikrom tel ile yapılan kesimlerdeki farklı sıcaklıkların CNC makinelerdeki güç tüketimlerine etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kesimi yapılan farklı malzemelere göre yüksek akım ihtiyacını karşılamaya yönelik Çift Birleşim Yüzeyleli Transistör (BJT) tabanlı doğru akım (DA) regüle devresi önermişlerdir [17].

Strafor kesme makineleri özelleşmiş CNC makineleri arasında yer almaktadır. Strafor kesme makineleri üzerine yapılan araştırmalar daha çok iki, üç ve dört eksenli strafor kesme makinelerinin tasarlanması ve geliştirilmesi üzerinedir. Syahriza vd., [18] Arduino kontrol kartlı iki eksenli CNC strafor kesme makinesi geliştirmişlerdir. Fahrizal vd., [19] iki eksenli CNC strafor kesme makinesi tasarlamış ve deneyler yapmışlardır. Yapılan çalışmada kesilen parçalardaki hata oranları da hesaplanmıştır. Ivanovskis [20] tarafından 2017 yılında yapılan tez çalışmasında uçak modellemek için dört eksenli sayısal kontrollü sıcak telli köpük kesici geliştirmiştir. Figliolini vd. [21] tarafından tasarlanan makine alışılmış sıcak tel strafor kesme makinelerinin dışındadır. Tasarlanan makine x, y, z eksenlerine ek olarak z eksenine bağlanmış döner bir eksen de

içermektedir. Tel ise döner eksenin ucuna ve döner eksene dik bir şekilde bağlanmıştır.

Mevcut araştırmaların yanında endüstriyel üretim süreçlerinde kullanılan CNC sıcak tel strafor kesim makineleri de bulunmaktadır. Bu makinelerin birçoğu ile yatay ve dikey eksenle kesim yapılabilen ancak döner bir tablaya sahip olmamaları nedeniyle spiral formlu (burgulu) kesimler yapılamamaktadır. Çalışmanın temel motivasyonu halihazırda iki veya dört eksen olarak çalışan sıcak tel strafor kesim makinelerine beşinci eksen olarak döner bir tabla eklenmesi ile spiral formlu kesimlerin de yapılabileceği prototip bir makine üretmektir.

Çalışmada tasarlanan CNC makinesinin öne çıkan özellikleri:

- Strafor malzemesinin kesimi sıcak bir tel yardımıyla yapılmaktadır.
- Tasarımda kullanılan 360° dönebilir özelliğine sahip tabla yardımıyla, makine beş eksen olarak çalışabilmektedir.
- Makine kolları birbirinden bağımsız şekilde hareket edebilmektedir.
- Makine, portatif olarak kullanılabilir.

Çalışmanın 2. bölümünde makine eksenlerinin tasarımı ve elektronik kontrol panosu sunulmaktadır. Bölüm 3'te tasarlanan prototip makineye ait kesim aşamaları ve örnek çalışmalar ortaya konulmaktadır. Makale, Bölüm 4'teki değerlendirmeler ile sonuçlandırılmaktadır.

## 2.TASARIM VE YÖNTEM

### 2.1. Sistem Tasarımı

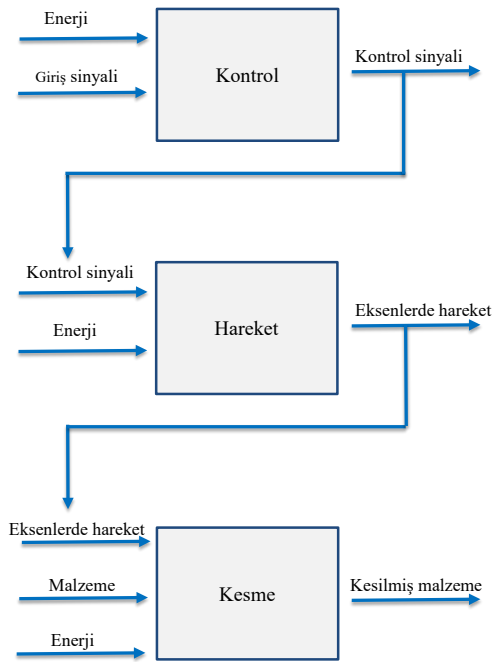
Prototip üretimi yapılan makinenin amacı strafor kesmektir. Bu nedenle üretilecek makine 'Strafor Kesme Makinesi' olarak adlandırılabilir. Bu makine bilgisayar kontrollü sayesinde straforun otomatik olarak kesilmesini sağlar. Makineye gönderilen kontrol sinyali nasıl bir kesim yapılacağını belirler. Verilen kontrol sinyali sayesinde eksenler hareket eder ve hareket eden tel kesim işlemi yapar. Şekil 1'de sistemin işleyiş ana fonksiyonu verilmiştir [22].



Şekil 1. CNC strafor kesme makinesi ana fonksiyonu [22].

Şekil 2’de CNC kontrollü strafor kesme makinesinde 3 adet alt fonksiyon sunulmuştur [22]. Bunlar;

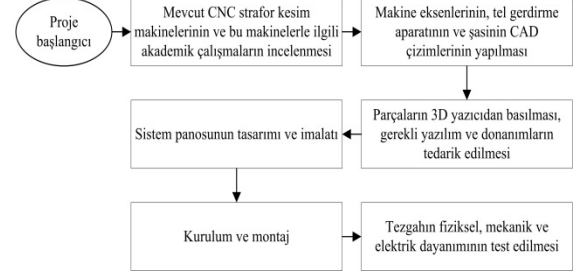
- Kontrol alt fonksiyonu,
- Hareket alt fonksiyonu,
- Kesme alt fonksiyonu.



Şekil 2. CNC strafor kesme makinesi alt fonksiyonları [22].

Prototip CNC makinenin üretimi için öncelikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan CNC sıcak tel strafor kesim makineleri fiziksel ve operasyonel çalışma şartları açısından incelenmiştir. Bu makinelerin tasarımlarını, optimizasyonlarını ve iyileştirmelerini konu alan güncel akademik çalışmalar da detaylıca araştırılmıştır. Eksen parçaları üretilmeden önce Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) çizimleri yapılarak üretim sürecine geçilmiştir. Üretim sürecinde gerekli parçalar 3D yazıcıdan basılmış, ihtiyaç duyulan yazılım ve donanımlar tedarik edilmiştir. Sistem kontrol panosu içerisinde kullanılacak elektronik devrelerin benzetim çalışmaları yapılarak, makine sistem panosu imal edilmiştir. Montaj ve kurulum

işlerini takiben de prototip CNC makinesi test edilmiştir. Bu aşamaların gösterildiği blok diyagram Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. CNC strafor kesme makinesi üretim aşamaları.

## 2.2. Makine Eksenlerinde Hareket

Kartezyen makinenin tasarımında dikkate alınması gereken en önemli şey koordinat sistemidir. Koordinat sisteminin belirlenmesi özellikle tercih edilen yazılım programı için önemlidir. Kartezyen koordinat sisteminde x-ekseni makinenin yatay hareketini, y-ekseni ise makinenin dikey hareketini temsil etmektedir. Kolların sağa ve yukarı hareketleri pozitif, ters yöndeki hareketleri ise negatif kabul edilmiştir. Makine üzerinde kolların başlangıç konumu sol alt köşede yani 0.0 konumundadır. Şekil 4’te ve Şekil 5’te sırasıyla x ve y eksenlerinin çizimleri verilmektedir.

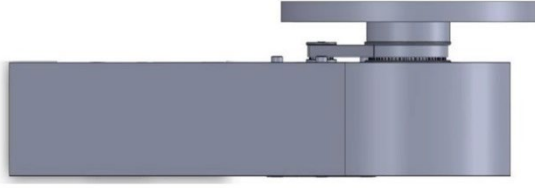


Şekil 4. x-ekseni CAD çizimi.



Şekil 5. y-ekseni CAD çizimi.

Koordinat sisteminde z-ekseni yukarı aşağı yönü temsil etmektedir. Bu makinenin tasarımında z-ekseni, x-ekseni veya y eksenine paralel 360° dönebilen bir eksteni temsil etmektedir. Şekil 6’da ve Şekil 7’de sunulduğu üzere döner tabla iki farklı şekilde kullanılabilir.



Şekil 6. z-ekseni (y-eksenine paralel) CAD çizimi.



Şekil 7. z-ekseni (x-eksenine paralel) CAD çizimi.

### 2.3. Kesme İşlemi

Kesme işlemi için öncelikle uygun sıcaklık ve hareket hızı sağlanmalıdır. Bunlar sağlandıktan sonra iki kol arasında bağlanan telin yeterince gergin olması gerekir. Kollar birbirinden bağımsız hareket ettiği için tel boyu değişken olmalıdır. Bunun için telin boyu değiştikçe telin hala gergin kalmasını sağlayan bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 8'de sunulduğu üzere y-eksenindeki hareketli parça üzerine bağlanan yaylı sistemle, telin boyu değişmektedir. Şekil 9'da tel gerdirme aparatının makine kollarına bağlanmış hali verilmektedir.



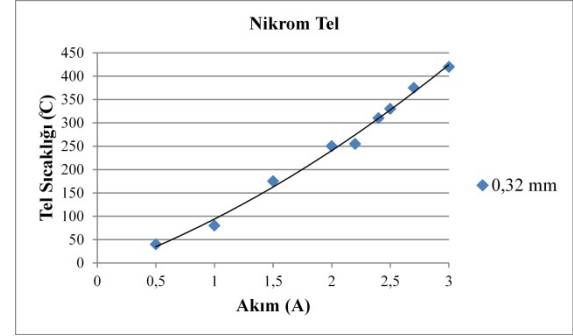
Şekil 8. Teli gerdirme aparatı CAD çizimi.



Şekil 9. Tel gerdirme aparatı montajlı hali CAD çizimi.

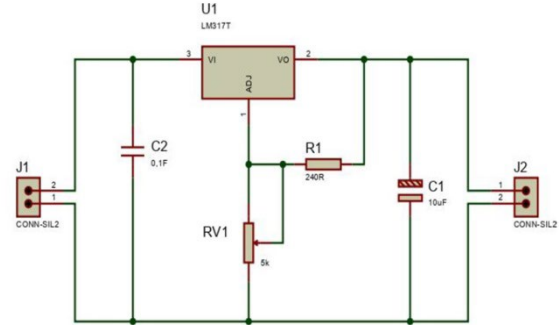
### 2.4. DA Gerilim Regülatörü

Telin sıcaklığının ayarlanması güç kaynağından çıkan gerilimin değiştirilmesiyle mümkündür. Strafor köpüğün kesimi için elektrik ile ısıtılan nikel krom alaşım ve çapı 0,3 mm olan tel kullanılmıştır. Abeyinghe vd. tarafından 0,32 mm çaplı nikrom tel kullanılarak yapılan tel sıcaklığı-akım değişimi çalışmasına [13] ait sonuç grafiği Şekil 10'da paylaşılmaktadır.



Şekil 10. Tel sıcaklığının akım ile değişim grafiği [13].

Prototip makinedeki kesimler için sabit kalınlığa sahip straforlar kullanılmaktadır. Sıcaklık değişimi DA gerilim regülatörü sayesinde yapılmaktadır. Şekil 11'de DA gerilim regülatörünün devre şeması verilmektedir.



Şekil 11. DA gerilim regülatörü devre şeması.

#### 2.4.1. Kullanılan Telin Direnci ve DA Gerilim Regülatörü Çıkış Parametreleri

Maddelerin elektrik enerjisinin iletilmesine karşı gösterdikleri dirence "elektiriksel direnç" denir. Güç kaynağından çekilen akımın hesaplanabilmesi için kullanılan telin direncinin hesaplanması gerekmektedir.

Kablo direncinin hesaplanması aşağıdaki etmenlere bağlıdır.

- Kablo metalinin öz direnci
- Kablonun uzunluğu
- Kablonun kesiti

İletkenin direnci Denklem (1) kullanılarak hesaplanır [23].

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

$R$ : Bir iletkenin direnci ( $\Omega$ )

$\rho$ : Bir iletkenin öz direnci ( $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ )

$l$ : Bir iletkenin uzunluğu ( $m$ )

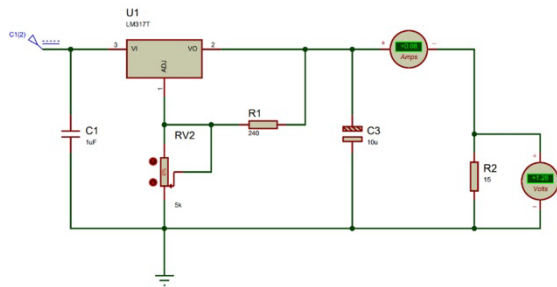
$A$ : Bir iletkenin kesiti ( $mm^2$ )

Tel olarak nikrom tel kullanıldığı için hesaplamalar nikrom telin öz direnci olan  $1,05 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$  üzerinden yapılmaktadır. Kullanılan telin çapı  $0,3 mm$  seçilmiş, uzunluğu  $1 m$  kabul edilmiştir.

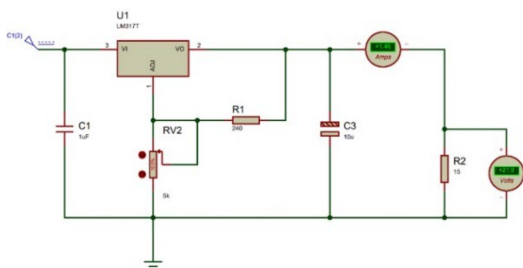
Eşitlik (2)'de sunulduğu üzere, nikrom telin direnci  $15 \Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$$R = 1,05 \frac{1}{\pi \times 0,15^2} \approx 15 \Omega \quad (2)$$

Şekil 11'de sunulan devrenin çıkışına direnç hesabı yapılan nikrom teli temsilen  $15 \Omega$ 'luk yük bağlanmaktadır. Potansiyometrenin ayar konumuna göre ölçülen gerilim değerleri  $1,2 V - 22 V$  arasında, ölçülen akım değerleri ise  $0,08 A - 1,46 A$  değerleri arasında değişmektedir. Şekil 12'de ve Şekil 13'te sırasıyla potansiyometrenin %0 ve %100 konumları için elde edilen ölçüm sonuçları verilmektedir.



Şekil 12. Potansiyometre %0 konumunda.

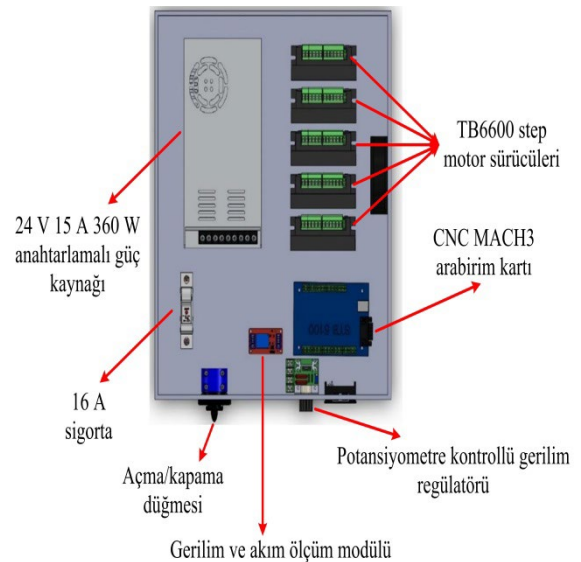


Şekil 13. Potansiyometre %100 konumunda.

Şekil 10 referans alındığında, prototip üretimi yapılan makinedeki kesimler için  $200^\circ C$  civarında bir sıcaklık  $2 cm$  civarında bir köpüğü kesmek için yeterli olacaktır.

## 2.5. Pano Tasarımı

Makinenin hareketi step motorlar ve bu motorların sürücüleri tarafından sağlanmaktadır. Güç kaynağı ise sisteme güç sağlamaktadır. Teli uygun sıcaklığa getirmek için DA gerilim regülatörüne ihtiyaç vardır. Gerilim ölçümü ise dijital voltmetre ile sağlanmaktadır. Kontrol kartıyla tüm sistem kontrol edilmektedir. Pano tasarımında kullanılan  $24 V, 15 A, 360 W$  anahtarlamalı güç kaynağı ile DA gerilim regüle devresi ve CNC MACH3 arabirim kontrol kartı beslenmektedir. Sıcaklık kontrolünü sağlayan DA regülasyon devresinin açıp/kapatılması da yine pano üzerine konulan harici bir aç/kapa anahtar ile yapılmaktadır. Mach3 kontrol kartı ile tezgâh tasarımında kullanılan Nema17 step motorların sürücüleri (TB6600) kontrol edilmektedir. DA regülasyon devresinden ölçülen akım ve gerilim değerleri bir display aracılığıyla pano üzerinden takip edilmektedir. Panoda yüksek akımları önlemek amacıyla  $16 A$  sigorta kullanılmaktadır. Pano tasarımı CAD çiziminin üstten ve önden görünüşleri sırasıyla Şekil 14'te ve Şekil 15'te sunulmaktadır.



Şekil 14. Pano CAD çiziminin üstten görüntüsü.

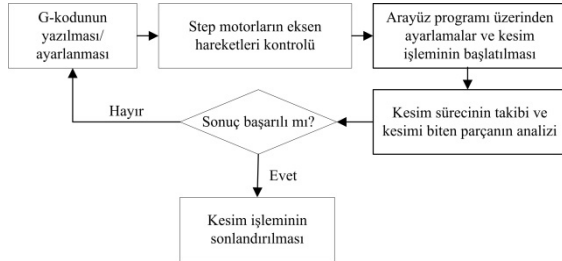




Şekil 15. Pano CAD çiziminin önden görüntüsü.

## 2.6. Yazılım

Kartezyen sistemini kullanan çoğu makine gibi tasarlanan makine de G-kodu tabanlıdır. İstenilen çizimin yapılabilmesi ancak çizimin makinenin anlayabileceği G-kodu diline çevrilmesiyle mümkündür. Bir bilgisayar yardımıyla kesimi yapılacak parçanın CAD programında çizimi yapılmakta ve Bilgisayar Destekli Üretim (CAM) programı aracılığıyla G-kodu dönüşümü yapılmaktadır. CNC Mach3 kontrol kartı aracılığıyla CNC makinenin eksen hareketleri kontrol edilmektedir. Nikrom tel istenilen sıcaklık değerine ayarlanarak kesim işlemi başlatılmaktadır. Kesim işlemi sırasında ve kesimden sonra, kesimi yapılan parça fiziksel olarak incelenerek kesimin başarısı değerlendirilmektedir. İstenilen başarımın elde edilememesi durumunda G-kodları üzerinde tekrardan bir çalışma yapılmaktadır. Kesim işleminin başarılı olması halinde süreç sonlandırılmaktadır. Bu aşamaları gösteren blok diyagram Şekil 16'da verilmektedir.

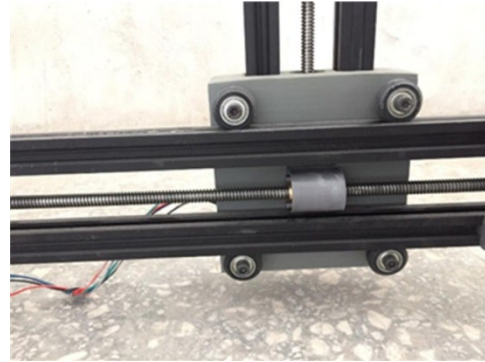


Şekil 16. Kesim işlemi blok diyagramı.

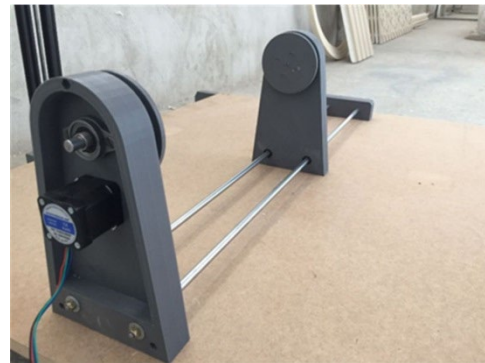
## 2.7. Makine Parçalarının Üretimi

Kavramsal tasarım çalışmaları sonucunda makinenin parçaları ve nasıl çalışacağı belirlenmiştir. Kesilecek olan parçanın döner bir eksene bağlı olduğu, telin bağlı olduğu kolların bağımsız olarak iki eksende hareket edebildiği kartezyen bir sistem düşünülmüştür. Strafor köpüğü kolaylıkla kesebildiği için kesici olarak ısınabilen bir tel kullanılmıştır. Makine kolları; hafiflik, dayanım ve montaj kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle 20 \* 20 mm V slot sigma profillerden üretilmiştir. Öteleme hareketlerinde sigma profil üzerinde hareket edebilen rulmanlı tekerlere karar verilmiştir. Makine ana gövdesi maliyet avantajı sağlaması adına Orta Yoğunluktaki Lif Levha (MDF) ve plastikler kullanılarak üretilmiştir. MDF

tablanın kalınlığı 18 mm'dir. Makinenin doğrusal hareketi 2 mm hatveli vidalı mil ve somunlarla sağlanmaktadır. Bu vidalı millerin birer ucu motorlara, diğer uçları rulmanlı yataklara bağlanmıştır. x-ekseni için 100 cm, y-ekseni için 50 cm vidalı mil kullanılmıştır. Şekil 17'de vidalı mil ve somun sunulmaktadır. Döner tablanın hareketi ise kayış kasnak sistemiyle sağlanmaktadır. Motorun miline bağlı bulunan kasnak, hareketi kayış aracılığıyla daha büyük bir kasnağa aktarmaktadır. Kasnaklar arasında 1:3 oran bulunmaktadır. Döner tabla Şekil 18'de sunulmaktadır. Makede kullanılan telin boyu eksen hareketlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Projede tasarlanan tel gerdirme mekanizması bu boy değişikliklerinde yeterli gerginliği koruyabilmektedir. Tel gerdirme mekanizmasına ait görsel Şekil 19'da verilmektedir. Makinenin köpüğü işleme ölçüleri 900 mmx900 mmx390 mm olup, makinenin genel görüntüsü Şekil 20'de sunulmaktadır.



Şekil 17. Vidalı mil ve somun.



Şekil 18. Döner tabla.



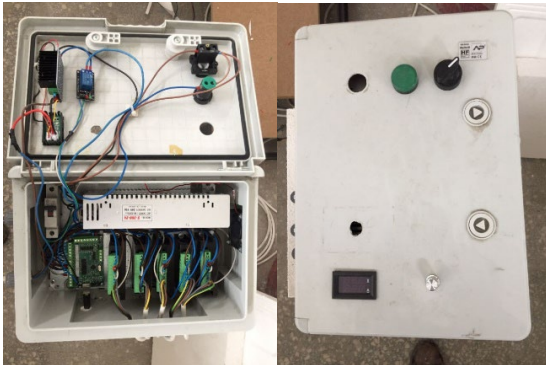
Şekil 19. Tel gerdirme mekanizması.



Şekil 20. Makinenin genel görüntüsü.

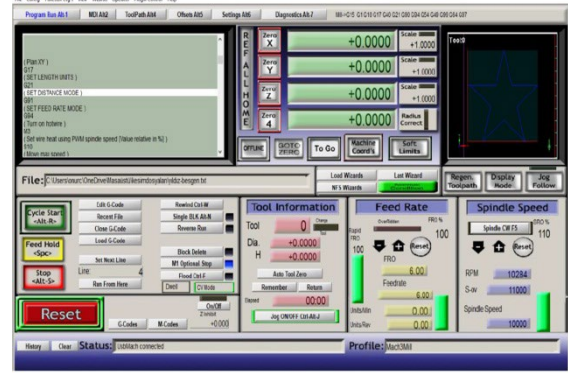
### 3. SİSTEM KONTROLÜ VE TEST ÇALIŞMALARI

Şekil 14’te CAD çizimi verilen kontrol panosunun üretilmiş hali Şekil 21’de sunulmaktadır. Kontrol panosu; kontrol kartı, sürücüler, sigorta ve güç kaynağından oluşmaktadır. DA gerilim regülatörü, multimetre ve gerilim regülatörünü açık kapatan anahtar pano içerisinde yer almaktadır.



Şekil 21. Makine kontrol panosu.

Hareket kontrol kartı Mach3 programı ile kontrol edilmektedir. Mach3 programı sayesinde makinenin hızı ayarlanabilmekte ve manuel olarak telin ıslısı açılıp kapatılabilmektedir. Mach3 ana ekranı Şekil 22’de verilmiştir. Mach3 programı daha önceden hazırlanan G-kodlarını kullanarak makinenin hareketini sağlamaktadır.



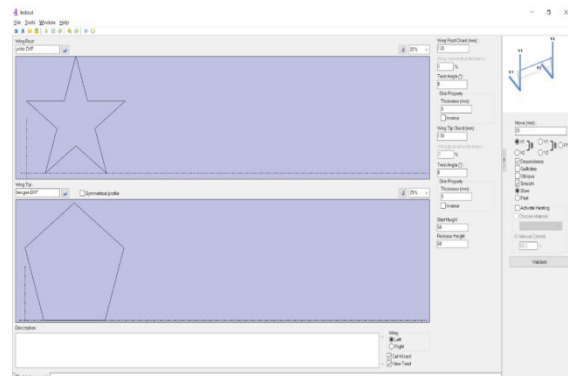
Şekil 22. Mach3 ekranı.

#### 3.1. Test Çalışmaları

Bu aşamada tasarımı, imalat ve testleri tamamlanan CNC strafor kesme makinesi ile örnek çalışmalar yapılmıştır. Döner tablalı ve döner tablanın olmadığı iki ayrı durum için makinede kesimler yapılmıştır. Yapılan örnek çalışmalar bu bölümde gösterilmiştir.

##### 3.1.1. Dört Eksen Kesimler

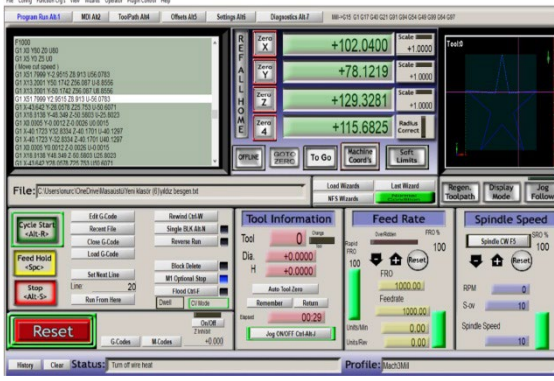
Solidworks programında ayrı ayrı çizilen yıldız ve beşgen şekiller .dxf formatında kaydedilmiştir. Jedicut programında bir kenarı yıldız bir kenarı ise beşgen olacak şekilde parçanın ölçüleri ve kesim yolu ayarlanmıştır. Bu durumu ifade eden görsel Şekil 23’te verilmektedir. Şekil 24’te Mach3 ekranındaki G- kodunun akışı, Şekil 25’te Mach3 programı arayüzü, Şekil 26’da işlenen parçanın anlık olarak kesim anındaki görüntüleri, Şekil 27’de ise kesilen parçanın görüntüsü verilmektedir.



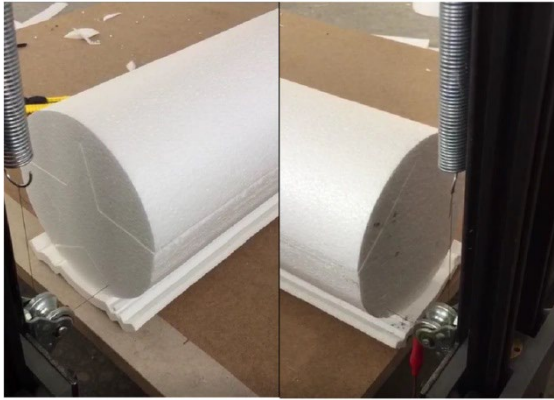
Şekil 23. Jedicut program arayüzü.



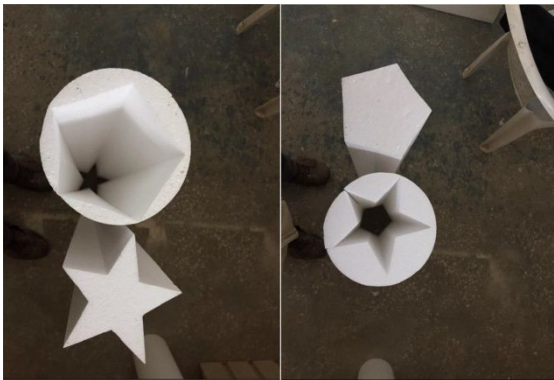
Şekil 24. Yıldız-beşgen kesim G-kodu akışı



Şekil 25. Yıldız-beşgen kesim Mach3 ekranı.



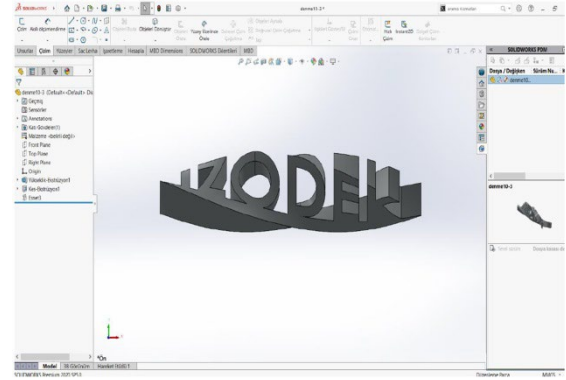
Şekil 26. Yıldız-beşgen kesim anlık kesim görüntüsü.



Şekil 27. Yıldız-beşgen kesim.

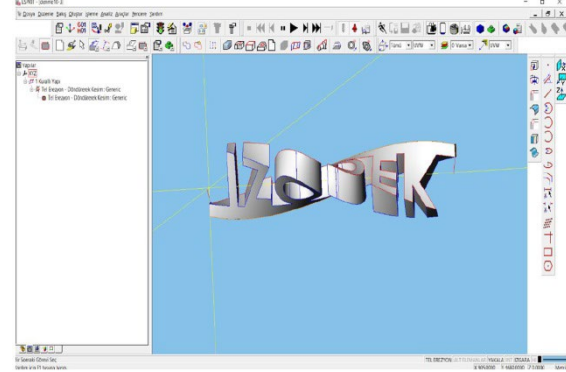
### 3.1.2. Döner Tablolu Kesimler

Döner tablunun eklenmesiyle makine beş eksenli de çalışabilmektedir. Şekil 28'de sunulan görsel üç boyutlu olarak Solidworks programında çizilerek .sldprt uzantısıyla kaydedilmiştir.



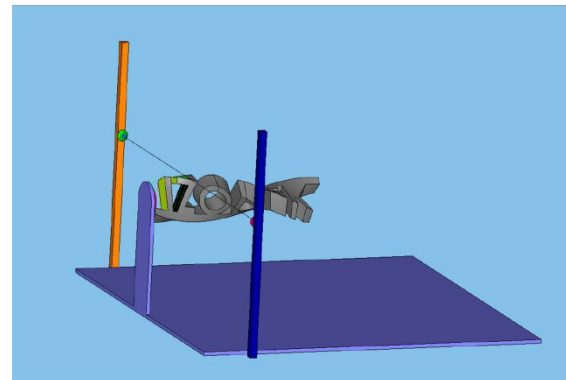
Şekil 28. Solidworks programında çizilmiş şekil.

Çizimi yapılmak istenilen. sldprt uzantılı görsel işlenerek makinenin çalışması için gerekli olan G-kodları Esprit programında hazırlanmıştır. Şekil 29'da Esprit programının arayüzü ve kesim yolu görülmektedir.



Şekil 29. Esprit programının arayüzü.

Şekil 30'da çizimi hedeflenen görselin simülasyonu, Şekil 31'de ise beş eksenli makine tarafından kesimi tamamlanan parçalar sunulmaktadır.



Şekil 30. Esprit programında parçanın kesim simülasyonu.



Şekil 31. Burgulu yazı.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tasarlanan makine için öncelikle literatür araştırması yapılmış ve piyasada kullanılan strafor kesme makineleri incelenmiştir. Bu araştırmalarda mevcut makinelerin birtakım eksiklerinin olduğu görülmüştür. Mevcut makineler iki eksenli ya da dört eksenli çalışmaktadır. Beşinci eksen olarak döner bir eksenin eklendiği kesim makinelerine imalat sektöründe ihtiyaç duyulmaktadır. Bağımsız kolları sayesinde dört eksenli gibi çalışabilen makineye döner tablanın eklenmesi, makinenin beş eksenli çalışabilmesine olanak sağlar. Kesim sırasında hareket ve sıcaklık parametrelerinin makineye tanımlanması gerekmektedir. Sıcaklık kontrolü için DA gerilim regülasyon devresi tasarlanarak istenilen kesim sıcaklığına potansiyometre yardımıyla ulaşılmaktadır. Eksen hareketleri step motorlar ile yapılmaktadır. G-kodları ile eksen hareketleri makine dilinde tanımlanmakta, MACH3 kontrol kartı ile de step motor sürücülerini yönetilmektedir.

Prototip üretimi yapılan makine ile dört eksen kesimlere örnek olabilecek yıldız-beşgen kesimler yapılmıştır. Bu kesim tipine ait sonuçlar Şekil 27’de sunulmaktadır. Çalışmanın temel motivasyonunu oluşturan döner tabla ile spiral formlu şekiller kesilebilirken bağımsız kollar ile de simetrik olmayan şekiller kesilebilmektedir. Şekil 31’de döner tablanın kullanıldığı burgulu yazı kesim formatına ait kesilen parçaya ait bir görsel sunulmaktadır. Döner tablanın kullanılarak sıcak telli strafor kesiminin yapıldığı bir başka çalışma ise vazo kesimidir. Şekil 32’de strafor kesiminde döner

tablonun kullanıldığı vazo kesim anının görüntüsü, Şekil 33’te ise kesim sonucunda elde edilen parça sunulmaktadır.



Şekil 32. Vazo kesim anındaki görüntüsü.



Şekil 33. Burgulu kesim.

Yapılan test kesimlerinde makinenin geliştirilebilecek yönleri de tespit edilmiştir. Sıcaklık hız ayarının istenildiği gibi yapılamadığı görülmüştür. Makinenin yüksek hızları için sıcaklık düşük kalmaktadır. Bu durum güç kaynağından bağımsız ayrı bir oto transformatör ile düzeltilebilir. Çalışmalarda karşılaşılan en büyük zorluk istenilen çizimin CAM programında G-koduna dönüştürülmesinde yaşanmaktadır. Strafor kesim makineleri için özelleşmiş CAM programları bulunmamaktadır. CAM programı eksikliği nedeniyle bazı kodlar elle yazılmıştır. Bu da hata oranını arttırmaktadır.

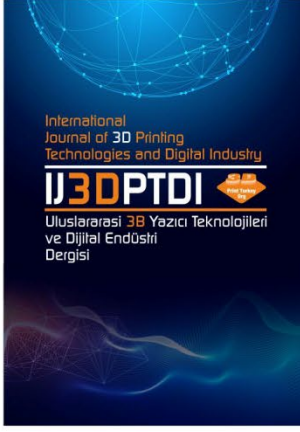
**KAYNAKLAR**

1. Koc, K.H., Erdinler, E.S., Hazir, E., Öztürk, E., “Effect of CNC application parameters on wooden surface quality”, *Measurement*, Vol. 107, Pages 12-18, 2017.
2. Cesur E., Cesur M.R., Aydoğan B.N., “CNC Tezgahlarının Dijital İkiz Modeli ile Komut Tamamlanma Sürelerinin Tahmin Edilmesi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, Vol. 7, No. 2, Pages 303-321, 2023.
3. Bal, B.C., “CNC makinelerinin bazı ayarlarının parça işleme süresi ve lif levhanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri”, *Malzeme Bölümü. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, Cilt 2018 -1, Sayı 1, Sayfa 21-30, 2018.
4. Aydoğmuş, D., “Doğaltaş CNC Makinelerinin çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak seçimi”, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar*, 2021.
5. Li, J., Wang Y., Li, Y., Luo W., “Reference trajectory modification based on spatial iterative learning for contour control of two-axis NC systems, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 25, No. 3, Pages 1266-1275, 2020.
6. Naqvi, S.Y.A., “Design, prototype, and control of 5-axis desktop CNC milling machine”, *Master of Science, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Karabuk University, Karabük*, 2014.
7. Gün, M.S., Kaygısız, H., Çetinkaya, K., “Beş eksenli beşik sistemli CNC tasarımı ve imalatı”, *I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14)*, Sayfa 6-11, Karabük, 2014.
8. Bakar, M.H.A., Samsudin, M.H., Zamri, M.N., Abdullah, R.I.R., Kasim, M.S., Abdullah, A., “Development of three-axis mini milling machine for small scale production”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 761, Pages 273-276, 2015.
9. Rahman, Z.A., Mohamed, S.B., Minhat, M., Rahman, Z.A., “Design and development of 3-axis Benchtop CNC milling machine for educational purpose”, *International Journal of Integrated Engineering*, Vol. 15, No. 1, Pages 145-160, 2023.
10. Kuncan, M., Kaplan, K., Ertunç, H.M., & Küçükateş, S., “Design, production and novel NC tool path generation of CNC tire mold processing machine”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol. 33, No. 3, Pages 1183-1999, 2018.
11. Öztürk, S., & Kuncan, M., “Kameradan alınan görüntünün CNC tezgahında gerçek zamanlı olarak işlenmesi”, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 9, Sayı 3, Sayfa 1251-1263, 2020.
12. Brooks, H., “Plastic foam cutting mechanics for rapid prototyping and manufacturing purposes”, *Doctor of Philosophy, University of Canterbury, Christchurch*, 2009.
13. Abeysinghe, A., Abeysiriwardena, S., Nanayakkarawasam, R., Wimalasiri, W., Lalitharatne, T.D., Tennakoon, S., “Development of a numerically controlled hot wire foam cutting machine for wing mould construction”, *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, Sayfa 60–65, Moratuwa, 2016.
14. Mohammed, I.Q., Kadhum, A.H., “Optimizing the parameters of hot-wire CNC machine to enhance the cutting of plastic foam”, *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, Vol. 15, No. 3, Pages 29-37, 2019.
15. Petkov, K.P., Hattel, J.H., “A thermo-electro-mechanical simulation model for hot wire cutting of EPS foam”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 107, Pages 50-59, 2016.
16. Karmakar, N., Subbiah, S., “Investigating bowing of hot wire during cutting of EPS”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 26, Pages 671-680, 2018.
17. Memon, S., Kalwar, I.H., Memon, A.H., Shakir, M., Mustafa, H., Rehman, S.U., “Hot wire thermopole cutting using CNC machine”, *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 4, Pages 19-27, 2023.
18. Syahriza, Aulia, U., Muspika, L., “Design and development wire cutter CNC for styrofoam product”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 931, Pages 1-9, 2020.
19. Fahrizal F., Aslam M.F., Anwar N., Isminarti I., Fitriati A., “Design of styrofoam cutting machine based on CNC 2 axis using hot wire”, *Journal of Computer Engineering, Electronics and Information Technology*, Vol. 1, Issue 2, Pages 63-74, 2022.
20. Ivanovskis, L., “Four axis hot-wire foam cutter controlled by mindstorms EV3”, *Undergraduate Thesis, Saimaa University of Applied Sciences Faculty of Technology, Lappeenranta*, 2017.
21. Figliolini, G., Rea, P., Cocomello, C., “Mechatronic design and prototype of a 4-DOFs hot-wire CNC cutting machine”, *RAAD: International*

Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region, Pages 591-598, Torino, 2017.

22. Şefkatlıoğlu, E., “CNC strafor kesme makinesi tasarımı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2015.

23. Bird, J., Electrical circuit theory and technology”, 5<sup>th</sup> Edition, Page 19, Routledge Taylor&Franscis Group, Abingdon, 2014.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION ON A 3D-PRINTED SHELF BRACKET

**Yazarlar (Authors):** Berker Özün Fenni <sup>ID</sup>\*, Ersin Eken <sup>ID</sup>, Hüseyin Kaygısız <sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Fenni B. Ö., Eken E., Kaygısız H., "Application of Topology Optimization on A 3d-Printed Shelf Bracket" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 32-45, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1331696

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# APPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION ON A 3D-PRINTED SHELF BRACKET

Berker Özün Fenni<sup>a</sup> , Ersin Eken<sup>a</sup> , Hüseyin Kaygısız<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Istanbul Gedik University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, TURKEY

<sup>b</sup>Istanbul Gedik University, Vocational School, Machinery Programme, TURKEY

\*Sorumlu Yazar: [berker.ozun@hotmail.com](mailto:berker.ozun@hotmail.com)

(Received: 24.07.23; Revised: 24.11.23; Accepted: 31.01.24)

---

## ABSTRACT

In this study, the topology optimization approach was adopted to reduce the material used in manufacturing. Specifically, the mass optimization technique was deemed suitable. Mass optimization eliminates the parts that don't affect a bracket's overall strength while under load, resulting in weight reduction and material savings. Two shelf brackets were designed to test this theory and were subjected to mass optimization. A static structural analysis of this optimized model was carried out to confirm the optimization findings. These designs were then manufactured using the 3D-printing process. The yield points were next determined by performing a uniaxial tensile test on the shelf brackets. The outcome of the tests was subsequently compared with the simulation results, and a cost analysis model was created as an output. Ultimately, a reduction of 70% in mass was achieved with acceptable structural strength. In related optimization studies, the connecting part of an unmanned aerial vehicle's landing gear has been optimized resulting in fuel savings. The theory that topology optimization may be used to make both light and stiff parts at the same time has been proven by the results of this research as well as other studies that have been done on the same topic.

**Keywords:** Topology optimization, finite element analysis, 3D-printing, CAD.

---

## 1. INTRODUCTION

With the rapid advancement of the manufacturing industry, the need for lightweight and durable parts has increased exponentially. To accommodate this, research has been carried out to find ways to make goods faster at a lower cost. Therefore, developing and manufacturing these parts has become increasingly important with time.

In industries such as automotive, there is a continuing need for lighter and more durable parts. In order to sell more cars, the manufacturers always competed for better fuel efficiency. As the vehicles get lighter, it will result in a reduction in fuel consumption as well. Consequently, mass optimization is a possible approach to reducing fuel consumption in vehicles [1].

As a result, the finite element analysis (FEA) was created to address these problems in engineering. This matrix-based method has then enabled the use of structural analysis methods in engineering. In the years that followed, the FEA approach was improved, and methods for structure optimization were introduced.

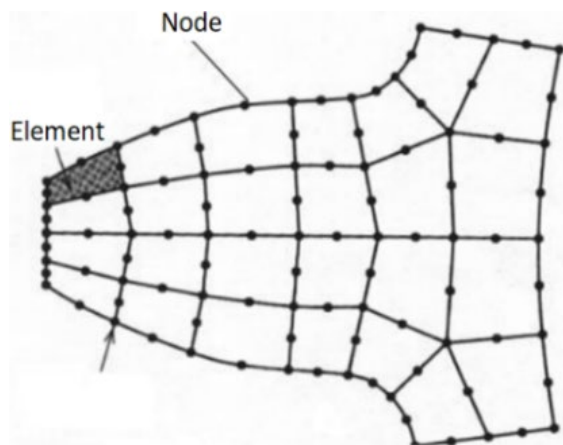
Structural optimization, also known as topology optimization (TO), reduces the amount of material used by only assigning it to the parts' load-bearing regions and eliminating it from the regions that have the least effect on the design's strength and natural frequency. Numerous TO techniques are available nowadays that may be used according to the intended use and compatibility of the design [2].



The FEA is a numerical method used to derive approximate solutions for various engineering problems. This method allows for analyzing stress, heat transfer, fluid mechanics, and electromagnetism problems that exhibit time dependence, independence, linearity, and nonlinearity. According to Moaveni [3], simplification techniques, such as iteration and approximate mathematical methods, have solved complex engineering problems typically addressed by applying mathematical formulas and expressions.

Moaveni [3] asserts that Courant is widely recognized as the individual who pioneered the finite element method in 1943. The next significant advancement in applying FEA commenced during the 1950s when Boeing incorporated triangular tension elements to model aircraft wings.

In 1967, Zienkiewicz and Chung published the first work in this field. Then, in the late 1960s, MSC created the first piece of FEA software, NASTRAN. Subsequently, the ANSYS software was developed in 1971. ANSYS can perform various types of analysis, including static, dynamic, heat transfer, fluid mechanics, and electromagnetism analyses [4]. Numerous software applications for FEA have been developed over time.



**Figure 1.** Depiction of elements and nodes in FEA [5].

In order to perform structural analysis, the model must be meshed. The process of dividing the model into discrete elements and nodes is called meshing, as seen in Fig. 1. As the quantity of elements increases, the number of iterations will correspondingly increase. This progressive increase in iterations leads to a convergence towards the actual result, thereby enabling the determination of a more accurate and refined outcome.

Upon the completion of meshing, it is vital to assign mechanical properties and material characteristics to the model. Typically, these characteristics encompass Young's modulus, which pertains to elasticity, and Poisson's ratio. Once the process of mesh modeling has been finalized, boundary conditions and loads are subsequently imposed on the elements and the nodal points. The structural analysis can begin after these prerequisites are met.

Structural analysis may be classified into two categories: dynamic and static. This study involves the execution of linear static analysis. Stress, shear stress (von Mises stress), principal forces (principal stresses), the factor of safety (FoS), and strain or deformation are some of the things that are looked at in the analyses. The desired values may be determined by applying these criteria to the solution [6].

After the analysis has been completed, structural optimization can begin. TO is a technique for structural optimization that has been developed within the realm of FEA. This method is widely employed across various industries, including automotive, aviation, and construction. TO aims to achieve the most efficient allocation of material within specified boundary conditions. Regions that do not significantly impact a part's overall strength and natural frequency when subjected to a load are eliminated through conditions that reduce mass or volume. By employing this method, resources are conserved, achieving optimal structural rigidity and the lightest possible design.

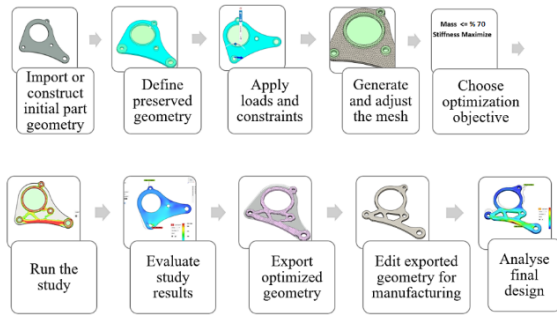


Figure 2. Shape optimization flow chart [7].

As illustrated in Fig. 2: The process begins with the creation of a model. Then the file is submitted to the analysis software, where critical parts that are not intended to be removed are excluded. Next, load allocation and boundary conditions are put in, generating the model's mesh. Subsequently, the optimization objective is put in. Then, a new analysis is performed on the optimized model to validate the analysis findings.

There are numerous studies in the literature that demonstrate the success of mass optimization. One of these is a biomedical paper by Ege and Küçük [8]. According to Ege and Küçük, reducing the weight by utilizing particle swarm optimization on a robotic-type above-knee prosthesis may enhance battery life. Several optimizations were carried out to determine the best outcome. These optimized specimens were then manufactured using a 3D printer and tested with a DC motor. The specimen with 60% infill rate yielded the best results, successfully increasing the battery life of the robotic prosthesis by 51%, or 1.89 hours while maintaining acceptable structural rigidity.

The formulation for mass optimization is as follows:

$$(K - \omega^2 M)u = f \quad (1)$$

'K' is the global stiffness matrix, so the global mass matrix 'M' may also be given as:

$$K = \sum_{i=1}^{N_e} \int_{\Omega} K^{(i)} d\Omega \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^{N_e} \int_{\Omega} M^{(i)} d\Omega \quad (3)$$

The element stiffness matrix, denoted as ' $K^{(i)}$ ' and the element mass matrix, shown as ' $M^{(i)}$ ', are matrices used to analyze a given region ' $\Omega$ '. The variable 'i' represents the specific element being considered. The angular frequency is represented by ' $\omega$ ', the node load vector by 'f', and the vector displacements by 'u'. Additionally, ' $N_e$ ' represents the total elements [9].

The analysis incorporates structural damping as a complex element stiffness matrix to guarantee a solution to Eq. 1 across all natural frequencies.

$$K^e = K_0^i (1 + \eta(\omega)), \begin{cases} \eta = \hat{\eta} & \omega > 0 \\ \eta = 0 & \omega = 0, \end{cases} \quad (4)$$

In order to differentiate the static stiffness matrix of the undamped system, the number '0' is added to the subscript. Additionally, ' $\hat{\eta}$ ' represents the structural loss factor. To address the given static equation, the value of ' $\omega = 0$ ' is selected and denoted as ' $u_{static}$ '. The design variables involve the presence or exclusion of material in each element. Consequently, the stiffness, mass matrices, and displacements depend on these design variables. External load is assumed to be independent of design variables [9].

The shape that results from optimization will be intricate in nature. As a result, the utilization of traditional manufacturing procedures for these parts may be challenging. Consequently, different manufacturing methods must be considered.

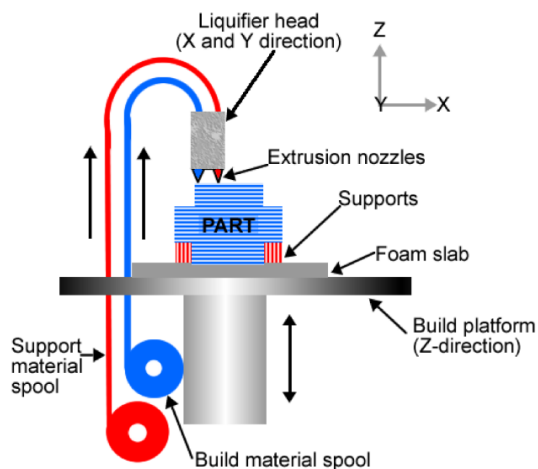
Casting is one of the processes described. However, the strength of cast parts is not always satisfactory. Furthermore, for each new part, a new mold must be made, vastly increasing the upfront cost of casting. As a result, another manufacturing method must be considered. Consequently, additive manufacturing (AM) was introduced. Later, these intricate geometries started being produced cheaper using AM [10].

Fused deposition modeling (FDM), commonly referred to as 3D-printing, has significantly transformed the manufacturing sector. This method enables the rapid and cost-effective production of structures with intricate geometries, surpassing the capabilities of

conventional manufacturing techniques. The manufacturing of polymeric materials, such as ABS and PLA, has been prevalent in the initial stages of this process. However, recent technological advancements have enabled the production of metallic components [11,12]

Wohler and Gornet [13] assert that the initial sample of AM was created by 3D Systems in 1987, known as stereolithography. The aforementioned procedure is executed through the utilization of the curing of photosensitive ultraviolet (UV) liquid polymers or photopolymer resins. The acronym STL is derived from the nomenclature of the stereolithography technique employed in this additive manufacturing process.

In 1991, FDM was developed. This system is the precursor to contemporary 3D-printing machines that employ filaments. The process involves the introduction of polymer filaments into the hot nozzle and extruder, which are deposited in a layered manner on the bed to fabricate a three-dimensional model, which may be seen in Fig. 3 [13].



**Figure 3.** FDM printing machine schematic [14].

The strength of 3D-printed parts is influenced by various factors, including the choice of filaments and parameters such as layer thickness, extrusion temperature, infill rate, printing speed, printing angle, and printing direction [15].

Regarding the variation in strength concerning the extrusion angle, Gonabadi et al. [16] stated that the tensile strength decreases as the extrusion angle approaches  $90^\circ$ . Conversely, the strength increases as the angle decreases as seen in Fig. 4, graph a.

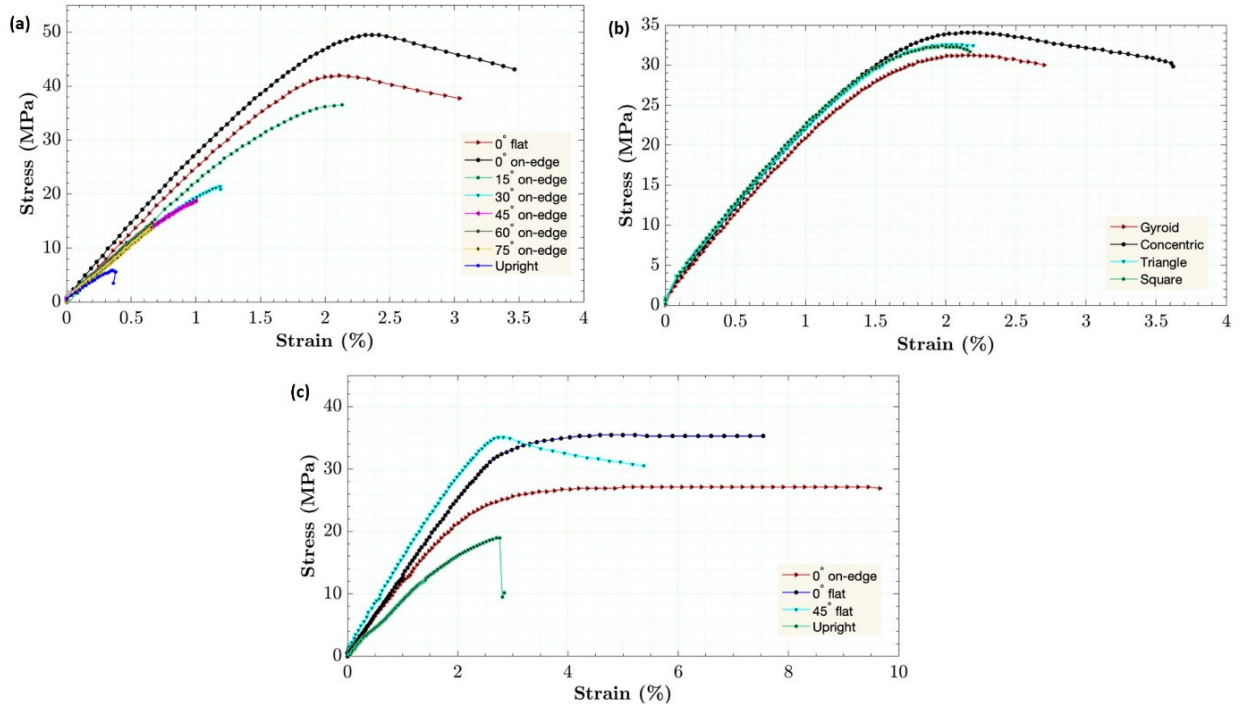
As for the printing direction, the tensile strength of a 3D-printed part is typically weaker in the deposition direction due to the inherent characteristics of the deposition process. When a part is printed along the "Z" axis, it exhibits reduced strength in that particular direction. The material in question is referred to as transversely isotropic, as Gonabadi et al. [16] indicated (Fig. 4, graph c).

Delaminating these materials within their walls are comparatively easier than attempting to crush them in the opposite direction.

The influence of the infill pattern on the tensile strength of 3D-printed components has been observed in the research conducted by Gonabadi et al. [16]. The study examined four distinct printing patterns. Based on the examination of the test results, it may be observed that both triangle and square patterns exhibited comparable characteristics. The patterns of triangles and squares exhibited the lowest strain levels, as depicted in Fig. 3 (graph b).

The infill density may also influence the tensile strength of 3D-printed parts. According to the findings of Gonabadi et al. [16], it can be observed that an increase in infill density leads to an equal rise in tensile strength.

In conclusion, the stress-strain curves depicted in Fig. 4 illustrate the influence of various parameters on the tensile strength of 3D-printed components. In light of this information, the following parameters were suited to fit this study: 100% infill density, utilization of a square printing pattern, alignment along the  $0^\circ$  flat axis, and adherence to a flat  $0^\circ$  printing angle.



**Figure 4.** Stress-strain curves of the effect of printing angle (a), pattern (b) and axis (c) on tensile strength [16].

When designing solid parts, the FoS must be taken into consideration. By applying the FoS, any uncertainty in new designs is eliminated. Including this coefficient is crucial for developing a design that ensures safety and durability over an extended period. The FoS can be determined based on the purpose of the design, as well as the anticipated environmental conditions and expected period of use. The calculation of this coefficient is typically performed as follows [17]:

$$\sigma_{allow} = \frac{S_y}{N_{design}} \quad (5)$$

In this context, ' $\sigma_{allow}$ ' stands for the safe stress limit, ' $S_y$ ' for the failure stress, and ' $N_{design}$ ' for the design factor [17].

**Table 1.** General FoS according to load types [16].

Load Types	Factor of Safety
Static short-term loads	1-2.5
Static long-term loads	2-5
Varying loads	4-10
Repetitive loads	5-15
Fatigue loads	5-15
Impact loads	10-15

Table 1 shows that materials with a factor of safety below '1' fail and break. Furthermore, the factor of safety must be at least '2' to ensure a durable design [17].

This study aims to reduce the amount of material utilized in 3D-printers. In this regard, a shelf bracket was developed, and its weight was reduced by applying topology optimization, resulting in a 70% material savings. Following that, these brackets were then subjected to a series of experiments, which verified the results of the analyses. The most significant innovation of the study that should be highlighted is that it gives an example framework that is simple to follow. The experimental setup requires no industrial equipment and can be carried out in any workshop. Furthermore, this study could be replicated in a wide range of disciplines, from industrial applications to other experimental setups.

## 2. RELATED LITERATURE

Within the existing body of literature, numerous studies have been conducted to attain enhanced lightness to optimize material usage with many research goals in mind.

Özsoy et al. [18] conducted a study where they performed mass optimization on an N95-type mask to save material for 3D-printing. Initially weighing 66.27 g, the mask underwent optimization, reducing by 30%, 40%, and 50% in weight. A decrease in weight was successfully accomplished, resulting in the conservation of material.

In the study carried out by Çelebi and Tosun [19], a mass optimization of 63% was applied to the samples. Subsequently, the optimized parts were manufactured with an FDM printer, and the unoptimized parts were produced via a CNC Router. Then, their mechanical properties were tested, and the results were compared. Consequently, the machined parts turned out to be stronger.

The study's objective conducted by Korkut and Koçak [20] was to investigate the potential reduction in the mass of an unmanned aerial vehicle's nose landing gear fork by utilizing TO. Based on the findings reported in the study, it was observed that a saving of 20-30 g of fuel per 100 km can be achieved for every 1 kg of weight reduced in the aircraft. When this fuel saving is multiplied by the annual flight time, it was found that 1 kg of weight reduction may save more than 2 million kg of fuel in a year. This optimization process reduced the part's mass from 2.54 kg to 1.51 kg while maintaining rigidity at a comparable level.

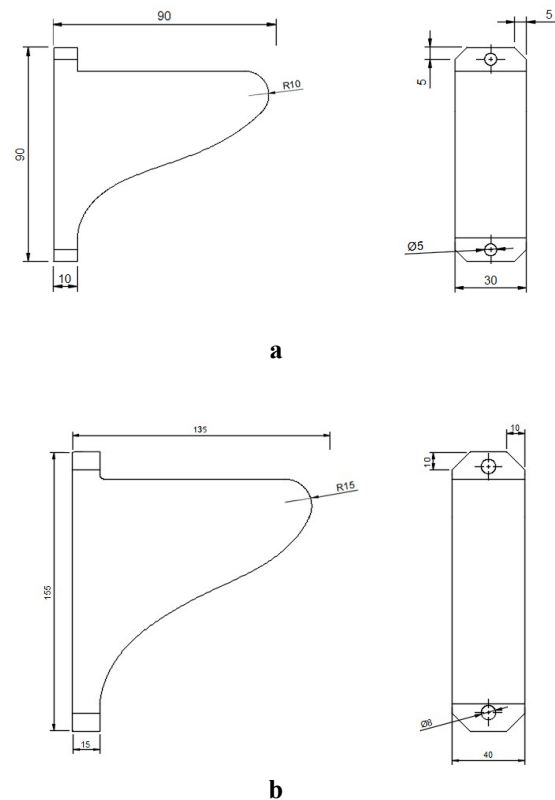
Aslan's study [6] aimed to achieve optimal geometry in a suspension swing arm by utilizing TO and lattice structural optimization techniques. The optimization outcomes were compared by employing three distinct lattice types. The initial mass of the object was 1.403 kg. Subsequently, it underwent a series of reductions, resulting in masses of 1.260 kg, 1.28487 kg, 1.31050 kg, and 1.249988 kg, respectively. The initial stress level was recorded as 252 MPa, followed by subsequent 184, 291, 287, and 317 MPa measurements. Consequently, the outcome of the third category of lattice optimization yielded the most desirable solution.

Top et al. [21] conducted a technical analysis of the bracket associated with the handbrake mechanism to be produced with AM techniques. A force of 500 N was exerted on the fastening holes of the brake mechanism in the model, resulting in a 43% reduction in the final mass of the formed shape, which measured 1.272 kg.

The study carried out by Demir et al. [22] aimed to apply topology optimization on a mobile transportation robot's chassis to reduce its weight by 20%. According to their findings, after the topology optimization application, the maximum stress value was found to be 48 MPa, and a value of 5.7 for the factor of safety. In conclusion, Demir et al. achieved a lighter design while maintaining structural rigidity.

### 3. MATERIALS AND METHOD

As seen in Fig. 5, small and large-scale models with dimensions of 90-90 mm and 155-135 mm were designed to conduct two different experiments. The choice was made with the purpose of breaking one bracket within the test setup because the analysis results indicated that the large-scale bracket would not fail when subjected to the maximum load with the testing equipment.



**Figure 5.** The technical drawings of the two brackets, Fig. 5-a depicting the 90-90 mm (small) bracket and Fig. 5-b the 155-135 mm (large) bracket.

These brackets have been subjected to a short-term static load in this study. The testing equipment at hand and the designed bracket geometry were best suited for this type of load. Therefore, dynamic loads were not investigated in this study.

Then, two designs were created accordingly. Following the design of the large and small brackets, initial mass and volume optimization experiments were conducted using ANSYS. The element dimension was originally set to 2 mm. However, due to the intricate nature of the surface, resulting from the application of TO, the reanalysis of the optimized geometry to validate the findings encountered mesh quality errors. In order to address this issue, the size of the element was reduced to 1 mm and 0.5 mm respectively. However, the intricacy of the problem proved to be formidable, to the extent that even a computer with moderate specifications, equipped with 16 GB of RAM, could not resolve it. The small bracket contained as many as 500,000 elements, and it couldn't be resolved.

Because of the unresolved issue, a decision was made to migrate to Autodesk Fusion 360. Due to its web-based nature, Fusion 360 operates on cloud infrastructure. Consequently, it does not impose any computational burden on the local machine.

Later, these models were imported into Fusion 360 for analysis. Subsequently, a mesh assignment was allocated to these components. The mesh quality was defined as 2 mm. Then, the load and the fixation of the holes were set as boundary conditions. Next, the structural analysis was commenced. The obtained results later get sent to the module for shape optimization. This process identifies and excludes critical regions by assigning appropriate boundary conditions. These critical regions refer to areas with holes and locations where the bracket will contact the wall. Additionally, the mass reduction technique eliminates regions with no significant impact on the component's overall strength and natural frequency. Afterward, the redundant regions were modeled and eliminated by projecting the formed structures onto the main component.

Performing smoothing after the completion of topological optimization in Fusion 360 is not recommended due to the additional removal of material from an already optimized structure, which may adversely impact its mechanical properties.

Following the completion of the design phase, two samples were fabricated utilizing PLA as the material in the process of 3D-printing. The samples consisted of one small-sized and one large-sized prototype.

According to Dhinesh et. al. [23] studies' test results, polylactic acid (PLA) showed better tensile strength and less deformation than acrylonitrile butadiene styrene (ABS). Due to this rationale, the selection of PLA material was made.

The mechanical and temperature properties of the PLA used in this study may be seen in the table below:

**Table 2.** Characteristics of the PLA used [24, 25]

Properties	Unit	Value
Density	$kg/m^3$	1,28
Tensile Strength	$MPa$	62,9
Yield Strength	$MPa$	56
Young Modulus	$MPa$	2850
Shear Modulus	$MPa$	1070,6
Poisson Ratio		0,33
Charpy Impact	$kJ/m^2$	14,2
Nozzle Temperature	$^{\circ}C$	200-230
Bed Temperature	$^{\circ}C$	60-75

The average value of the Poisson ratio for PLA was taken from the study of Ferreira et al [26].

The 90-90 mm prototype underwent a testing procedure resulting in its failure at a load of 2000 N. According to the simulation results the bracket was supposed to fail at a load of 1200 N. This corresponds to an error rate of 66.6%.

As for the bracket with 155-135 mm dimensions, it experienced failure when subjected to a force of 1000 N. The yield strength determined from the analysis was determined to be 3400 N. This discrepancy represents a 240% margin of error, which is highly implausible in practical terms.

Upon examination of the internal structure of the fractured brackets, it becomes evident that a hollow structure is present. A part manufactured at a 100% infill rate must exhibit a complete absence of voids within its internal structure. The potential causes of this error may include inaccuracies in the printing parameters or obstructions within the extruder nozzle.



**Figure 6.** The brackets' internal structure.

As seen in Fig. 6, this is a defective part since the brackets didn't fail from its determined area. The hollow structures may be seen in Fig. 6. These gaps are minor in the smaller bracket. In the case of the large bracket, because it is larger in size, the dimensions of the air gaps have proportionately enlarged, resulting in a considerable drop in strength beyond what the simulation indicated.

This behavior may be attributed to infill density. The failure of the 3D-printing machine to reach a complete infill rate led to the production of a flawed bracket. According to Gonabadi et. al. [16], the strength of PLA parts will decrease as the infill rate decreases.

### 3.1. Different Solution Suggestions

It is crucial to thoroughly examine the nozzle of the 3D-printing machine to identify and address any potential issues related to clogging.

When setting up the testing equipment, it is important to ensure the accurate application of the load. Otherwise, an inaccurate measurement may be obtained, and the magnitude of the load may vary depending on the location of the rope suspension.



**Figure 7.** Failure resulting from incorrect placement of the load.

As shown in Fig. 7., failure under a larger load than expected by the analysis may be attributed to a misplacement of the rope's suspension point, resulting in the application of force from an inappropriate location.

## 4. ANALYSIS RESULTS

The static structural analysis and the optimization results are presented in this section. Refer to Fig. 8 for the related pictures.

Firstly, the 90-90 mm bracket was subjected to a load of 1200 N, and then the deformation, von Mises stress, and FoS value were determined. Subsequently, a 70% reduction in mass was applied to the bracket to optimize it. Next, an additional static structural analysis was conducted on the optimized bracket to validate the findings and establish a comparative analysis with the previous outcomes.

As seen in Fig. 8-a., in the unoptimized configuration of the 90-90 mm bracket, the observed maximum deformation was determined to be 0.3481 mm at the tip of the bracket. At the same time, the mass of the component was measured to be 149 grams.

Regarding the von Mises stress, it came out to be 38.31 MPa. Fig. 8-b shows the areas around the holes with the largest stresses, with the bottom hole having the highest strains.

As shown in Fig. 8-c, the unoptimized 90-90 mm bracket exhibited a FoS of 1.6419 when subjected to a load of 1200 N. Consequently, it can be deemed suitable for long-term load applications at values below 1200 N.

As shown in Fig. 8-d, the mass has lowered from 149 grams to 46 grams following optimization. The optimized bracket was then subjected to another static structural analysis to confirm the findings.

In the post-optimization design, the maximum von Mises stress around the bottom hole increased from 38.31 MPa to 56.45 MPa, which may be seen in Fig. 8-e. This is a 47.35% increase in stress. To confirm whether the design will fail or not, the FoS was checked.

Based on the data presented in Fig. 8-f, the FoS for the lower hole is 0.9921. The FoS experienced a decrease of 60.44%. Given that the value is below '1', the bracket will yield under this load magnitude. It is advisable to apply values that are below 1200 N for this small bracket. Next, the magnitude of the load was halved to achieve a better FoS value.

After decreasing the load to 600 N, an increase of 99.98% was observed in the FoS: As seen in Fig. 8-g, it came out to be 1.984. This design is deemed safe under this load magnitude and may be used for long-term applications.

Next, the 155-135 mm bracket analysis was held. A load of 3400 N was applied to the bracket. Then the deformation, von Mises stress, and the FoS values were determined.

As shown in Fig. 8-h, the maximum deformation was determined to be 0.5123 mm at the tip of the bracket.

In Fig. 8-i, the max. von Mises stress occurs at the bottom hole with a value of 52.18 MPa.

In Fig. 8-j, the safety factor of the bracket was determined to be 1.205, so no yielding will be observed. However, using it with loads lower than 3400 N is recommended to be safe.

Subsequently, the mass of the bracket was reduced by 70%, and it was subjected to another static structural analysis to confirm these results. The weight of the 155-135 mm bracket was decreased to 154 grams after 70% mass optimization.

As depicted in Fig. 8-k, the maximum von Mises stress was observed to be 63.24 MPa at the bottom hole. This means a 21.2% MPa increase in von Mises stress over the non-optimized result.

As seen in Fig. 8-l, the 155-135 mm bracket exhibits yielding due to optimization, as indicated by a FoS of 0.8499. The FoS experienced a decrease of 41.78% when compared to the non-optimized bracket. Then, the load's magnitude was reduced by 50% to attain a FoS value surpassing 0.8499.

As shown in Fig 9-m, the FoS in the lower hole increased by 208% to 1.7678 when the load was reduced. It may be used safely under long-term loads without yielding under this load.

The table below contains all the analysis results of the 90-90 mm bracket.

**Table 3.** 90-90 mm bracket's analysis data.

Bracket	Deformation (mm)	Stress (MPa)	FoS	Mass (g)
90-90 mm optimized (600 N)	0,407	28,2 2	1,984	46
90-90 mm optimized (1200 N)	-	56,4 5	0,992 1	46
90-90 mm (1200N)	0,3841	38,3 1	1,641 9	149

It can be seen from Table 3 that there is no deformation data of the optimized bracket under a load of 1200 N. The inclusion of this data is unnecessary as the brackets in question are expected to fail regardless.

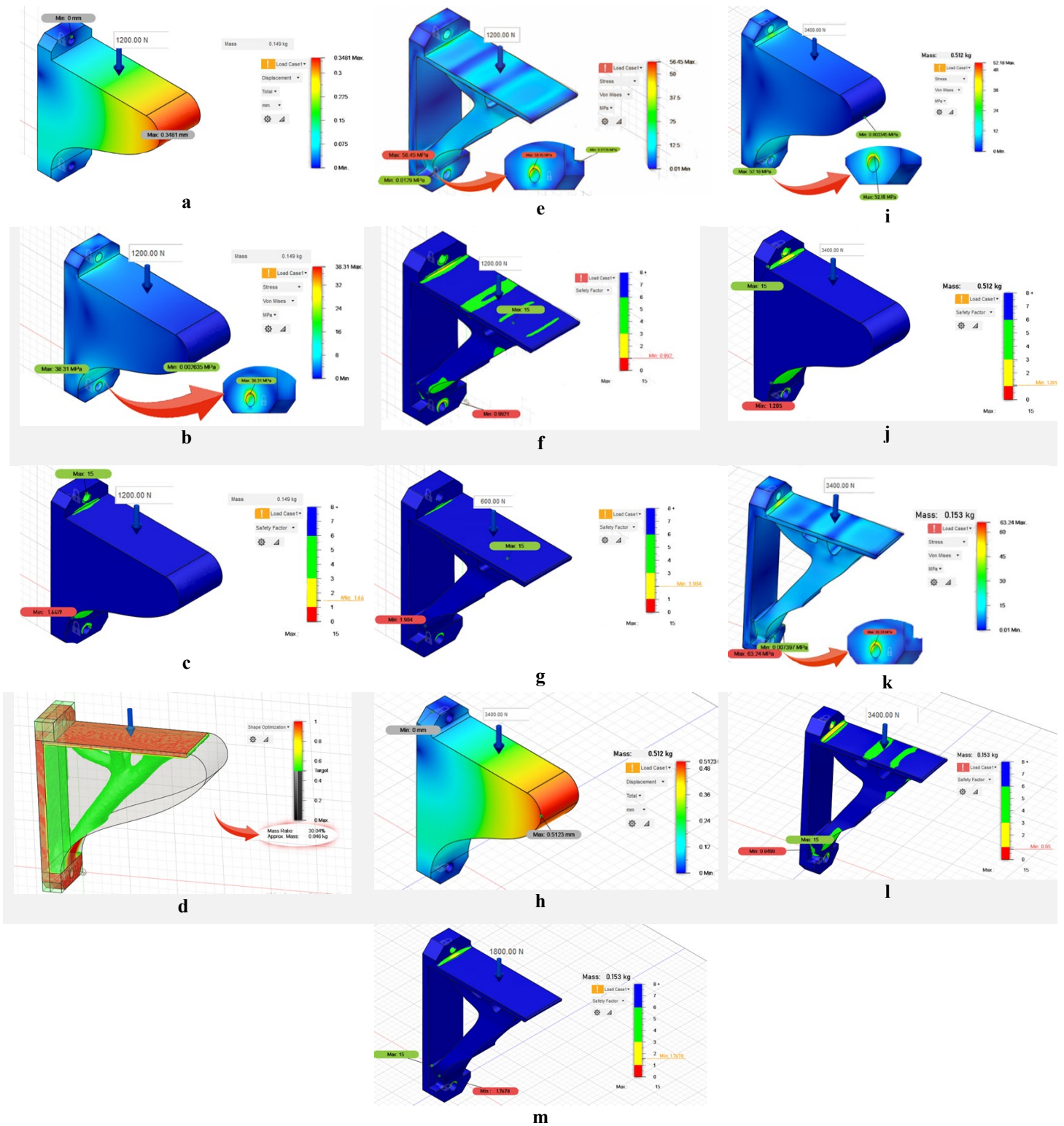
The rest of the analysis results are shown in Table 4.

**Table 4.** 155-135 mm bracket's analysis data.

Bracket	Deformation (mm)	Stress (MPa)	FoS	Mass (g)
155-135 mm optimized (1800 N)	0,6381	35,58	1,767 8	154
155-135 mm optimized (3400 N)	-	63,24	0,849 9	154
155-135 mm (3400 N)	0,5123	52,18	1,205	512

As in Table 3, the deformation data here is not needed.





**Figure 8.** The analyses results for both brackets, **a)** The deformation of the 90-90 mm bracket. **b)** The von Mises stress of the 90-90 mm bracket. **c)** The FoS of the 90-90 mm bracket. **d)** The geometric shape resulted from a 70% reduction in mass through the implementation of topology optimization. **e)** The von Mises stress of the 90-90 mm bracket after optimization. **f)** The FoS of the 90-90 mm bracket after optimization. **g)** The FoS of the optimized 90-90 mm bracket under 600 N load. **h)** The deformation of the 155-135 mm bracket. **i)** The von Mises stress of the 155-135 mm bracket. **j)** The FoS of the 155-135 mm bracket after optimization. **k)** The von Mises stress of the 155-135 mm bracket after optimization. **l)** The FoS of the 155-135 mm bracket after optimization. **m)** The FoS of the optimized 155-135 mm bracket under 1800 N load.

## 5. EXPERIMENTAL RESULTS

After completing the analyses and optimizations for both brackets, the obtained results were converted into STL format and imported into Prusa Slicer. During the slicing phase, the layer thickness was determined to be 0.1 mm, the infill rate was set to 100%, and lines printing pattern was selected for the internal structure. The nozzle temperature was 210°C, while the bed temperature was set to 60°C. In this study, Porima's PLA filament [27] was used for the printing material. Under these conditions, printing for the smaller bracket took 4.5 hours, and for the larger one, it took 20.

Once the manufacturing process was finished, then the test setup was established. First, a hole was drilled in a steel workbench. This was done to ensure that there is no deformation at the connection points when a load is exerted on these brackets. Only the bracket should be exposed to deformation. Therefore, only the bracket itself is affected when there is yielding. To mitigate potential damage to the holes in the bracket caused by screw heads, a washer is placed between them to facilitate a more uniform distribution of the load. The side view of the connection mechanism of the larger bracket may be seen in Fig. 9.



**Figure 9.** The connecting mechanism of the 155-135 mm bracket.

A wooden wedge was inserted between the rope, which was fastened to the upper part of the bracket, and its flat surface to achieve a more uniform distribution of the load on the bracket. Subsequently, the rope was threaded underneath the wedge and suspended from the

digital scale, as depicted in Fig. 10. The digital scale used has a maximum load capacity of 300 kg or 3000 N.

A long iron bar was attached using a bolt on the workstation and utilized as a lever to make the application of force more regulated. To keep the travel of the lever short, the length of the rope was kept short as well. To facilitate the lever's movement, avoiding excessive tightening of the nut that secures it to the workbench is advisable.



**Figure 10.** The load that the 90-90 mm bracket (a) fails at, and the 155-135 mm bracket withstands (right), the test setup for the experiment (b).

The experimental procedure involved capturing footage using a camera with a frame rate of 60 frames per second (FPS). Subsequently, a screenshot was extracted from the video editing software, specifically when the ultimate yield occurred. The magnitude of the

yielding in the smaller bracket was measured to be 1213.5 N, which may be seen in Fig. 10.

Upon examination, a discrepancy of 1.125% was found of the failure forces between the experimental and analytical findings for the 90-90 mm bracket. This difference in forces is quite marginal. However, this may be attributed to the limitations of the analysis software, which cannot simultaneously discern transverse isotropic and orthotropic structures, also known as 3D-printed materials. Furthermore, during the process of manufacture, the filament may not always adhere properly, resulting in poor strength. In addition, the digital scale may also suffer losses, and the slack or flex in the rope may all contribute to this disparity.

Ultimately, the large bracket overloaded the scale, enduring a load of 3000 N without any signs of yielding. This means that the large bracket is significantly stronger than the small one.

According to Bell and Siegmund [30], the strength of 3D-printed components increases as their size grows. Experimenting with small and large specimens, they determined that larger specimens would fail at higher stresses. This is attributed to the size of the layer thickness. As the size of the layer thickness increases, its' strength will increase as well.

## 6. COST ANALYSIS

Based on the data provided by Porima [27], the cost of 1 kg of PLA filament is 15.08 USD. This amounts to 0.01508 USD per gram. So, the cost of filament utilized in this study may be determined by multiplying the filament quantity and its unit cost:

$$C = n * m * g \quad (6)$$

Here 'C' equates to the total cost to manufacture one bracket. 'n' represents the number of brackets to be manufactured, 'm' represents the total mass of filament used, and 'g' denotes the cost of filament per gram.

The combined cost of a 90-90 mm and a 155-135 mm bracket equals just over 3 USD.

According to this cost analysis, mass optimization has resulted in a 70% reduction in the production cost of these shelf brackets.

## 7. CONCLUSION

This study demonstrates the feasibility of improving lightness and rigidity while achieving material savings through various optimization techniques. There has been a logical trend toward producing complex structures utilizing multiple materials and AM techniques in recent years.

A significant reduction of 70% in mass has been successfully achieved, resulting in the development of a safe design capable of withstanding loads below 3000 N. When comparing the findings of this study to the study conducted by Yıldız [28], it can be observed that the application of TO was more effective in our study. In Yıldız's study, applying TO reduce the weight of the control arm by 13.5%, meanwhile increasing the maximum stress by 24.16%. The findings of our study indicate that there was a modest 17.5% increase in maximum stress when comparing the optimized and unoptimized 155-135 mm brackets while reducing their mass significantly.

Based on this study's empirical and theoretical evidence, the idea suggesting the feasibility of concurrently generating light and highly rigid components through topology optimization has been proven.

This study could be more precisely replicated using alternative test equipment. Better precision may be achieved by designing a specimen specifically engineered for experimentation within a hydraulic press. Additionally, ANSYS may potentially be used to examine dynamic loads with a simpler design. Then this part may be tested using an axial accelerometer to confirm the analysis findings [29].

Consistent with the project's objectives, the analytical and experimental processes effectively demonstrated material conservation, lightweight construction, and structural rigidity. By carefully considering the design options and criteria outlined in the study and considering alternative solution proposals, this research may be replicated and expanded upon by employing different topology and production techniques.

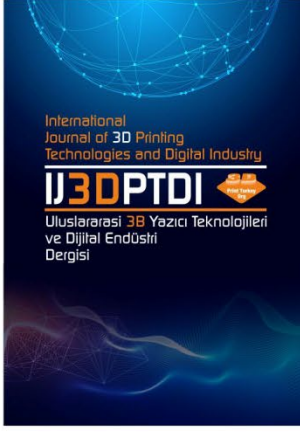
## ACKNOWLEDGES

This study was carried out in the Istanbul Gedik University Vocational School 3D printing lab and the machine workshop with the assistance of Research Assistant Emre Tuğberk GÜLNERGİZ and Technician Ismail ÖRS.

## REFERENCES

- Liu, S., Li, Q., Liu, J., Chen, W., Zhang, Y., "A Realization Method for Transforming a Topology Optimization Design into Additive Manufacturing Structures", *Engineering*, Vol. 4, Issue 2, Pages 277-285, 2018.
- Brackett, D., Ashcroft, I., Hague, R., "Topology Optimization for Additive Manufacturing", *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 348-362, Austin, Texas, 2011.
- Moaveni, S., "Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS 4<sup>th</sup> Edition", Pages 2-8, Pearson, USA, 2014.
- MacNeal, R. H., "Some Organizational Aspects of NASTRAN", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 29, Issue 2, Pages 254-265, 1974.
- Ergin, A., Bayraktarkatal, E., Ünsan, Y., "Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları", *Türk Loydu Vakfı*, 1-3, İstanbul, 2000.
- Aslan, B., "Yenilikçi Tasarım Yöntemleri Kullanarak Eklemeli İmalata Yönelik Optimum Ürün Geliştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 2019.
- Vlah, D., Žavbi, R., Vukašinić, N., "Evaluations of Topology Optimization and Generative Design Tools as Support for Conceptual Design", *International Design Conference*, Pages 451-460, Cambridge, 2020.
- Ege, M., Küçük, S., "Energy Minimization of New Robotic-Type Above-Knee Prosthesis for Higher Battery Lifetime", *Applied Sciences*, Vol. 13, Issue 6, Pages 3868, 2023.
- Larsson, J., Wennhage, P., Göransson, P., "Mass Minimization with Conflicting Dynamic Constraints by Topology Optimization Using Sequential Integer Programming", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 200, Pages 1-10, 2022.
- Aktimur, B., Gökpınar, E., "Katmanlı Üretim Havaçılıktaki Uygulamaları", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, Vol. 3, Issue 2, Pages 463-469, 2015.
- Turhan, S., Özsoy, A., "DLMS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, Vol. 8, Issue 2, Pages 15-27, 2016.
- Frazier, W. E., "Metal Additive Manufacturing: A Review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, Pages 1917-1928, 2014.
- Wohlers, T., Gornet, T., "History of Additive Manufacturing", *Wohlers Report*, Wohlers Associates, 2015.
- Sidambe, A. T., "Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review", *Materials*, Vol. 7, Issue 12, Pages 8168-8188, 2014.
- Hanon, M. M., Marczis, R., Zsidai, L., "Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 65, Issue 1, Pages 38-46, 2021.
- Gonabadi, H., Yadav, A., Bull, S. J., "The Effect of Processing Parameters on the Mechanical Characteristics of PLA Produced by a 3D FFF Printer", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 111, Issue 3-4, Pages 695-709, 2020.
- Hibbeler, R. C., "Mechanics of Materials 8<sup>th</sup> Edition", Pages 46-48, Pearson, USA, 2010.
- Özsoy, K., Şentürk, E., Aydoğan, D., Korucu, Ö. E., "3B Yazıcı Teknolojisi için Topoloji Optimizasyonu: N95 Maske Üzerine Bir Çalışma", *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, Vol. 9, Pages 152-159, 2020.
- Çelebi, A., Tosun, H., "Application and Comparison of Topology Optimization for Additive Manufacturing and Machining Methods", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 5, Issue 3, Pages 676-691, 2021.
- Koçak, M. R., Korkut, İ., "İnsansız Hava Aracı Burun İniş Takımı Çatalı için Topoloji Optimizasyonu Uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 1-1, 2022.

21. Top, N., Gökçe, H., Şahin, İ., “Eklemeli İmalat İçin Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması”, Journal of Selcuk-Technic, Vol. 18, Issue 1, Pages 1-13, 2019.
22. Demir, N., Sucuoğlu, H. S., Böğrekci, İ., Demircioğlu, P., “Topology Optimization of Mobile Transportation Robot”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Vol. 5, Issue 2, Pages 210-219, 2021.
23. Dhinesh, S. K., Arun Prakash, S., Senthil Kumar, K. L., Megalingam, A., “Study on Flexural and Tensile Behavior of PLA, ABS and PLA-ABS Materials”, Materials Today: Proceedings, Vol. 45, Pages 1175-1180, 2021.
24. Porima 3D, “Porima PLA Filamentler”, <https://static.ticimax.cloud/42373/uploads/dosyalar/porima-tds-tr.pdf>, January 13, 2023.
25. Porima 3D, “Porima PLA Filamentler”, <https://static.ticimax.cloud/42373/Uploads/Dosyalar/porima3d-e-katalog.pdf>, January 13, 2023.
26. Ferreira, R., Amatte, I. C., Dutra, T. A., Bürger, D., “Experimental Characterization and Micrography of 3D Printed PLA and PLA Reinforced with Short Carbon Fibers, Composites”, Part B Engineering, Vol. 124, Issue 1, Pages 88-100, 2017.
27. Porima 3D, “Porima PLA Filamentler”, <https://www.porima3d.com/porima-pla-filament>, January 13, 2023.
28. Yıldız, A. R., “Taşıt Elemanlarının Yapısal Optimizasyon Teknikleri ile Optimum Tasarımı”, Politeknik Dergisi, Vol. 20, Issue 2, Pages 319-323, 2017.
29. Çağlayan, B. Ö., Ozakgöl, K., Tezer, Ö., “Assessment of a Concrete Arch Bridge Using Static and Dynamic Load Tests”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 41, Issue 1, Pages 83-94, 2012.
30. Bell, D., Siegmund, T., “3D-printed polymers exhibit a strength size effect”, Additive Manufacturing, Vol. 21, Issue 1, Pages 658-665, 2018.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDE KULLANILABİLECEK PARALEL KİNEMATİK YAPIYA SAHİP 5 SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK SİSTEMİN MATEMATİKSEL ANALİZİ VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

MATHEMATICAL ANALYSIS AND REAL-TIME CONTROL OF A  
ROBOTIC SYSTEM WITH 5 DEGREES OF FREEDOM  
PARALLEL KINEMATICS STRUCTURE THAT CAN BE USED  
IN ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

**Yazarlar (Authors):** Ahmet DUMLU<sup>id</sup>\*, Mehran Mahboubkhan<sup>id</sup>, Kağan Koray AYTEN<sup>id</sup>  
Sadrettin GÖLCÜGEZLİ<sup>id</sup> Gürkan KALINAY<sup>id</sup>






**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Dumlu A., Mahboubkhan M., Ayten K. K., Gölcügezli S., Kalınay G., "Eklemeli İmalat Teknolojilerinde Kullanılabilecek Paralel Kinematik Yapıya Sahip 5 Serbestlik Dereceli Robotik Sistemin Matematiksel Analizi ve Gerçek Zamanlı Kontrolü" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 46-58, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1395993

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNDE KULLANILABİLECEK PARALEL KİNEMATİK YAPIYA SAHİP 5 SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK SİSTEMİN MATEMATİKSEL ANALİZİ VE GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

Ahmet DURLU<sup>a</sup> <sup>\*</sup>, Mehran Mahboubkhan<sup>b</sup> , Kağan Koray AYTEN<sup>a</sup>  Sadrettin GÖLCÜGEZLİ<sup>a</sup>   
Gürkan KALINAY<sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Bölümü, TÜRKİYE

<sup>b</sup>TebriZ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Bölümü, İRAN

\* Sorumlu Yazar: [ahmetdumlu@erzurum.edu.tr](mailto:ahmetdumlu@erzurum.edu.tr)

(Geliş/Received: 25.11.23; Düzeltme/Revised: 08.02.24; Kabul/Accepted: 10.02.24)

## ÖZ

Bu çalışmada, özellikle katmanlı üretim sorunlarının üstesinden gelmek için geliştirilmiş, beş serbestlik derecesine sahip yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemde, benzer sistemlerden farklı olarak, X ve Z eksenleri boyunca, sisteme dönme hareketleri dahil edilerek, geleneksel üç serbestlik dereceli yapı, beş serbestlik derecesine çıkarılmıştır. Belirtilen serbestlik derecelerinin sisteme eklenmesiyle, geleneksel sistemlerin aksine, parça yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesi, üretim süresinden tasarruf ve üretimde kullanılan destek parça kullanımının azaltılması sağlanacaktır. Çalışmada, öncelikle, sistemin kavramsal tasarımı tanımlanmıştır. Daha sonra sistemin kinematik ve dinamik modellerini belirlemek için matematiksel analizler kullanılmıştır. Sistemin eksen hareket performansını değerlendirmek için oransal-integral-türev (PID) kontrol tekniği kullanılmış ve gerçek zamanlı test çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmanın literatüre temel katkısı, üretim teknolojilerine yeni bir bakış açısı sunmak, sanayideki dönüşümü yönlendirmek, gelecekteki üretim süreçlerini şekillendirmek ve endüstriyel yeniliği tetiklemektir. Önerilen sistem ile geleneksel eklemeli imalat yöntemlerine göre daha esnek, sürdürülebilir, uygun maliyetli, daha hassas ve yüksek iş hızlarına ulaşabilen bir üretim modeli olarak literatüre sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli İmalat, Paralel Manipülatör, 5 Serbestlik Derecesi, 3D Yazıcı.

## MATHEMATICAL ANALYSIS AND REAL-TIME CONTROL OF A ROBOTIC SYSTEM WITH 5 DEGREES OF FREEDOM PARALLEL KINEMATICS STRUCTURE THAT CAN BE USED IN ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

In this study, a new system with five degrees of freedom has been proposed to overcome additive manufacturing problems. In the proposed system, unlike similar systems, the traditional three-degree-of-freedom structure is increased to five degrees of freedom by including rotational movements along the X and Z axes. By adding the specified degrees of freedom to the system, part surface integrity will be improved, production time will be saved and the use of support parts used in production will be reduced. In the study, first of all, the conceptual design of the system is defined. Mathematical analyzes were then used to determine the kinematic and dynamic models of the system. To evaluate the axis movement performance of the system, proportional-integral-derivative (PID) control technique was used and real-time test studies were carried out. The main contribution of this study to the literature is to offer a new perspective on production technologies, direct the transformation in the industry, shape future production processes and trigger industrial innovation. The proposed system is

presented in the literature as a production model that is more flexible, sustainable, cost-effective, more precise and can reach high work speeds compared to traditional additive manufacturing methods.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Parallel Manipulator, 5 Degrees of Freedom (DOF), 3D Printer.

## 1. GİRİŞ

Eklmeli imalat teknolojisi, son yıllarda üretim endüstrisinde önemli bir devrim yaratmış ve üçüncü sanayi devriminin temel taşlarından biri olarak kabul edilmiştir. Önemli ekonomi dergilerinden biri olan “The Economist” dergisinde yayımlanan makaleye göre, bu teknoloji özellikle karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretimini mümkün kılarak, endüstri üzerinde büyük bir ilgi uyandırmıştır [1].

Günümüzde, karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretiminde önemli bir rol oynayan eklmeli imalat teknolojisi, sürekli olarak gelişmekte ve literatürde birçok araştırmaya konu olmaktadır. Bu teknolojinin her geçen gün iyileştirilmesiyle, üretilen ürünlerin mukavemeti arttırılmakta [2], yüzey kalitesi optimize edilmekte ve üretim süresi kısaltılmaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinde, 3 doğrusal serbestlik derecesine sahip takım tezgâhları veya yazıcılar, ürünlerin üretiminde destek adı verilen ek parçalara ihtiyaç duymaktadır. Ancak, bu destek parçaları, üretim maliyetini arttırmakta, komplike parçaların üretim süresini ve sürecini karmaşık hale getirmektedir. Günümüz sanayisinde, klasik 3 eksenli eklmeli imalat sistemlerin üretim işlemlerindeki sınırlamaları aşmak için çeşitli donanımsal geliştirmelere odaklanılmaktadır. Bu geliştirmeler arasında, farklı kinematik yapıya sahip veya daha yüksek serbestlik derecesine sahip sistemlerin tasarımı önemli bir yer tutmaktadır. Karmaşık geometri parçaların üretimi, eklmeli imalat teknolojilerinde, özellikle çok eksenli paralel kinematik robotik sistemlerin kullanılmasıyla önemli ölçüde kolaylaştırılmıştır. Bu sistemler, karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretiminde var olan kısıtlamaların üstesinden gelerek ürünlerin daha etkili bir şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır [3]. Bu bağlamda, eklmeli imalat teknolojisinin geliştirilmesi ve yeni kinematik yapıların kullanılması sayesinde, ürün mukavemeti, yüzey kalitesi ve üretim süresi gibi kritik unsurların, endüstriyel uygulamalarda iyileştirerek, bu alanda daha verimli ve

rekabetçi çözümler sunma potansiyeli elde edilecektir.

Üste belirtilenler doğrultusunda, paralel kinematik yapıya sahip sistemler, özellikle eklmeli imalat teknolojileri için yapılan üretim adımı, kartezyen sistemlere kıyasla, daha yüksek doğruluk ve parça işleme hızı potansiyeli nedeniyle tercih edilmektedir. Yapılan araştırmalarda, eklmeli imalat teknolojilerinde bir adım öne çıkan farklı paralel kinematik yapıya sahip sistemlerde, sistemde kullanılan 4 ayrı motora bağlanan ayaklar yardımıyla 3 öteleme ve 1 dönme hareketi sağlanabilmektedir. Belirtilen kinematik yapının, Z eksenini etrafında gerçekleştirdiği dönme hareketi sayesinde, sistem üzerindeki serbestlik derecesini dörde çıkardığı ve bu sayede parça üretim süresinin kısaltılabildiği gösterilmiştir [4-12]. Bir diğer çalışmada, X eksenini etrafında dönme yeteneğine sahip bir paralel kinematik yapı olan, Delta tipi sistem geliştirilmiş ve bu sayede sistemin hareket kabiliyeti arttırılmıştır [5].

Belirtilen çalışmalardan farklı olarak, eklmeli imalat teknolojisinin mevcut zorluklarına çözüm getirmek amacıyla, önerilen bu çalışmada, paralel kinematik yapıya sahip yeni bir 3B yazıcı geliştirilmiştir. Geleneksel 3 doğrusal serbestlik derecesine sahip sistemlerin aksine, bu çalışmada önerilen tasarım, X ve Z eksenlerine kazandırılan dönme hareketleri sayesinde 5 serbestlik derecesine ulaşılmış, beşinci serbestlik derecesi tabla üzerine yerleştirilen ayrı bir motor yardımıyla sağlanmıştır. Benzer kinematik yapılardan farklı olarak, önerilen kinematik yapıımız sayesinde, sistem bir bütün olarak eş zamanlı çalışmakta ve bunun sonucunda da daha hassas ve daha hızlı parça üretim sağlanarak, ürün mukavemetini arttırmayı, dalgalı yüzey kalitesini iyileştirmeyi ve üretim süresini kısaltmayı hedeflemekteyiz. Ayrıca, önerilen sistemde X ve Z eksenlerinde dönme hareketinin kullanılmasıyla, parça yüzeyine paralel kavisli katmanların oluşturulması hedeflenmektedir. Bu şekilde, geleneksel



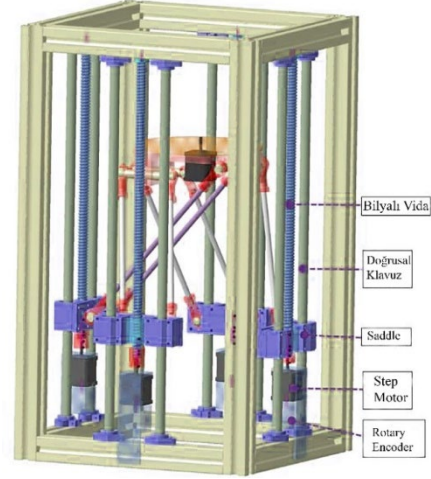
sistemlerde gereken destek parçalarının kullanımından kaçınılarak üretim süreci daha verimli hale getirilmektedir.

Bu makalede, önerilen sistem için öncelikle hem mekanik hem de elektriksel bileşenleri içeren konsept tasarımı sunulmuş ve ardından sistemin kinematik ve dinamik modeli yapılan matematiksel analizlerle belirlenmiştir. Son olarak PID kontrol tekniğini kullanılarak söz konusu sistemin eksen hareket performansları yapılan gerçek zamanlı test çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın literatüre asıl katkısı, geleneksel 3 boyutlu yazıcılardan farklı olarak üretim maliyetlerini azaltabilen ve daha yüksek hızlarda daha hassas çalışabilen yeni bir paralel kinematik yapıya sahip 3 boyutlu 5 serbestlik derecesine sahip yazıcının konsept tasarımı hakkında bilgi vermektir.

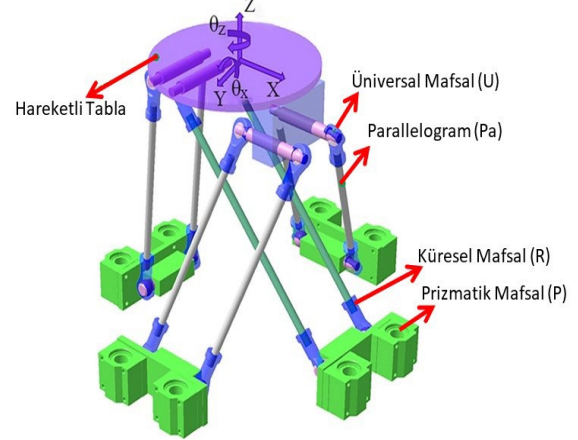
## 2. 5 SERBESTLİK DERECELİ 3D YAZICININ TASARIMI

Şekil 1 ve 2'de gösterildiği gibi, tasarlanan 3D yazıcı sistemi, dört kinematik zincirle birbirine bağlanmış sabit ve hareketli bir platformdan oluşmaktadır. Bu platform, iki adet PR(Pa)U ve iki adet PR(Pa)R kinematik zinciri içermektedir. Sistemdeki R, P, U ve Pa terimleri sırasıyla döner, prizmatik, universal mafsalları ifade etmektedir. Kinematik zincirlerin temel bileşeni, düzlemsel dört barlı paralelkenar yapısıdır. Her bir paralelkenar yapısı, dört bağımsız doğrusal ray sistemine monte edilmiş araçlar aracılığıyla hassas bir kontrol sağlamaktadır.

Paralelkenar yapısını oluşturmak için kullanılan arabalar, her bir bağlantıya küresel mafsallar aracılığıyla bağlanmaktadır. İkinci ve üçüncü kollar, hareketli platforma küresel mafsallar aracılığıyla bağlanırken, birinci ve dördüncü kollar dolaylı bir şekilde hareketli platforma bağlanmaktadır. Her bir bağlantı elemanı, hareketli platforma döner bir mafsalla bağlanmıştır. Hareketli platform, mevcut manipülatör için 3-DOF öteleme ve x-yönünde 1-DOF dönme hareketine izin veren bir yapıya sahiptir (Şekil 1 ve Şekil 2). Z yönündeki dönme hareketliliği ise bir döner tabla kullanılarak sağlanmaktadır.



Şekil 1. Önerilen 5 DOF paralel mekanizmasının yapısı.



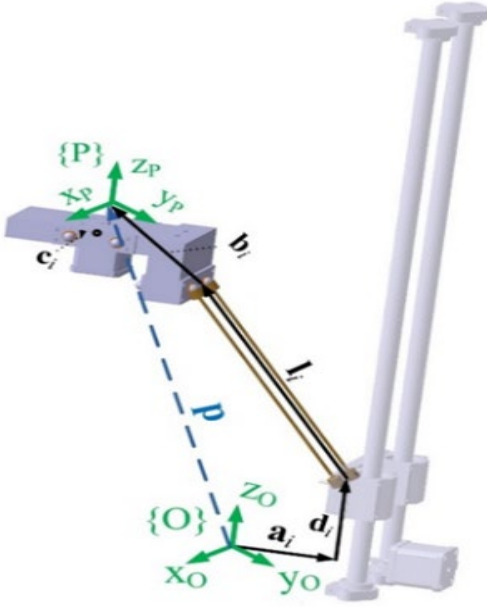
Şekil 2. Önerilen 5 DOF paralel mekanizmasının bağlantıları ve hareketli platformu

## 3. 5 SERBESTLİK DERECELİ 3D YAZICININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

### 3.1. Önerilen 5-DOF 3D Yazıcı Makinesinin Ters Kinematığı

Konum ve yönelim değerleri verildiğinde, hareketli bir platformun istenilen konuma ve yönelime ulaşabilmesi için gerekli olan bağların açısal konumlarını hesaplamak, kinematik analiz olarak adlandırılır [18]. Bu analizde, doğru bir sistem kontrolü ve aynı zamanda sistemin dinamik modelini etkili bir şekilde belirleyebilmek için, kinematik analizin hassas bir biçimde gerçekleştirilmesi gereklidir. Paralel mekanizmaların kinematik analizi için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar yöntemler arasında, geometrik yaklaşım, vektör cebri metodu, Denavit-Hartenberg metodu ve Bezout yöntemleri yer almaktadır [13-16]. Ek olarak kinematik analiz için son yıllarda Nelder-Mead ve genetik algoritmalar da faydalanılmaktadır [17].

Bu çalışmada, mekanizmanın ters kinematik analizi için vektör cebri yöntemi tercih edilmiştir. Analizi gerçekleştirebilmek amacıyla, sistemle ilgili bir vektör diyagramı Şekil 3'te sunulmuştur. Kinematik zincirlerin benzerliği nedeniyle, bu zincirlerden sadece bir tanesi ' $i$ ' indeksi ile temsil edilmiştir. Şekil 3'te gözlemlenebileceği üzere, global koordinat sistemi  $\{O\}$  orijinine sahiptir ve bu koordinat sistemi  $x_o, y_o$  ve  $z_o$  bileşenleri ile tanımlanmıştır.



Şekil 3. Önerilen manipülâtörün kinematik modellemesi için vektör notasyonu

Her prizmatik eklem için, global koordinat sisteminin orijini ile rayın başlangıç noktasını birleştiren  $a_i$  vektörü kullanılmıştır; araba üzerindeki  $i$  prizmatik eklemine bağlı olan  $d_i$  vektörü ise rayın yerel başlangıç noktasını göstermektedir.  $l_i$  vektörünün büyüklüğü,  $i$ . bağlantı kolunun uzunluğuna eşittir. Ayrıca,  $c_i$  vektörü,  $i$ . konektöre bağlı olup, küresel eklemlerin orta noktasından başlayıp konektörün döner ekseninde sona eren bir vektördür. Ancak,  $i = 2,4$  durumları için, mekanizmanın yapısı gereği  $c_i$  vektörü 0'a eşittir.  $b_i$  vektörü, Şekil 3'te belirtildiği gibi, hareketli platformun  $\{P\}$  merkezine sabitlenmiştir. Aynı zamanda,  $b_i$  vektörü, yerel çerçeve tarafından belirlenen paralelkenarların konumunu ifade eder. Tüm kinematik ilişkiler, global çerçeve  $\{O\}$ 'ya bağlı olan sabit platformu dikkate alarak tanımlanmaktadır. Şekil 3'te,  $i$ . kinematik zincir için vektörel eşitlik Denklem (1)'de gösterilmektedir.

$${}^0p + {}^0R_P b_i = {}^0a_i + {}^0d_i + {}^0l_i + {}^0c_i \quad (1)$$

Bu denklemde, vektörün global koordinat sistemiyle ilişkilendirilmesi için aşağıda verilen dönüşüm ifadesinin kullanılması gerekmektedir.

$${}^0b_i = {}^0R_P b_i \quad (2)$$

Denklem (2)'de temsil edilen  ${}^0R_P$  ifadesi, mekanik sistemdeki özellikler nedeniyle Denklem (3)'te belirtilen biçimde yalnızca  $x$  yönünde tanımlanmış bir rotasyon matrisidir.

$${}^0R_P = R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (3)$$

Denklem (1) ifadesinde,  ${}^0d_i$  ve  ${}^0c_i$  vektörleri daima birbirine paralel durumdadır. Bu sebeple  $\hat{d}_i$ ,  $d_i$  vektörleri birim vektördür, dolayısıyla, Denklem (1), Denklem (4)'teki gibi tekrar ifade edilebilmektedir.

$$(p + b_i - a_i - c_i \hat{d}_i) - l_i = d_i \hat{d}_i \quad (4)$$

Denklem (4)'te  $c_i$  ve  $d_i$ , sırasıyla  $c_i$  ve  $d_i$  vektörlerinin büyüklüklerini temsil etmektedir.  $l_i$  vektörel ifade ise  $l_i$  ile gösterilmekte ve değeri bilinmektedir. Denklem (4)'ün solda yer alan ifadesi, merkezi  $p + b_i - a_i - c_i \hat{d}_i$  ve yarıçapı  $l_i$  olan bir küreyi, sağda kalan ifade ise orijinden ve  $\hat{d}_i$  boyunca uzanan bir hattı belirtmektedir. Üsteki ifadeler doğrultusunda, uzayda bilinen bir küre ile bir doğrunun kesişimi, Denklem (4)'ün çözümüne karşılık gelmektedir. Belirtilen eşdeğerlilikler kullanılarak  $d_i$  ifadesi Denklem (5)'deki gibi elde edilebilmektedir.

$$d_i = \frac{-c_i + \hat{d}_i^T (p + b_i - a_i)}{\pm \sqrt{l_i^2 - (p + b_i - a_i)^T (I_{3 \times 3} - \hat{d}_i \hat{d}_i^T) (p + b_i - a_i)}} \quad (5)$$

Vektör analizi kullanılarak türetilen Denklem (5), mekanizmanın belirli bir konum ve yönelimde bulunduğu durumu tanımlamaktadır. Bu denklem aracılığıyla, mekanizmanın bu konum ve yönelim değerlerine ulaştırılabilmesi için gereken  $d_i$  uzunluğunu hesaplamayı mümkün kılmaktadır.

### 3.2. Hız ve İvme Kinematığı

Denklem (4)'ün zamana göre türevinin alınması, mekanizmanın hareketli platformuna ait hız vektörü,  $\dot{p}$ 'yi belirlemek için gereklidir.

$$\dot{p} + \dot{\theta} \hat{i} \times b_i = \dot{d}_i \hat{d}_i + \omega_{li} \times l_i \quad (6)$$

Bu ifadede, hareketli platformun açısal hız genliği,  $\dot{\theta}$ , olarak tanımlanır. Denklem (7)'nin elde edilebilmesi için, Denklem (6)'da verilen ifadenin her iki tarafı,  $l_i$  vektörü ile skaler çarpım yapılarak bulunmuştur.

$$\dot{d}_i = \frac{l_i}{\hat{d}_i \cdot l_i} \cdot \dot{p} + \frac{(\hat{i} \times b_i) \cdot l_i}{\hat{d}_i \cdot l_i} \dot{\theta} \quad (7)$$

Denklem (8), hareketli bir platformun açısal konumundan doğrusal konumuna dönüştüğü hız kinematığı ile ilgili matris gösterimini göstermektedir. Bu, elde edilen denklem (7) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \vdots \\ \dot{d}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1^T}{\hat{d}_1 \cdot l_1} & \frac{(b_1 \times l_1) \cdot \hat{i}}{\hat{d}_1 \cdot l_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{l_4^T}{\hat{d}_4 \cdot l_4} & \frac{(b_4 \times l_4) \cdot \hat{i}}{\hat{d}_4 \cdot l_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bu denklemde,  $J$ , sisteme ait Jacobian matrisini temsil etmektedir. Hareketli bir platformun ivme ifadesinin elde edilmesi için hız ifadesinin Denklem (6)'nın türevi alınmıştır.

$$\begin{aligned} \ddot{p} + \ddot{\theta} \hat{i} \times b_i + \dot{\theta}^2 \hat{i} \times (\hat{i} \times b_i) \\ = \ddot{d}_i \hat{d}_i + \dot{\omega}_{li} \times l_i + \omega_{li} \times (\omega_{li} \times l_i) \end{aligned} \quad (9)$$

Denklem (9)'un her iki tarafı,  $l_i$  vektörü ile noktasal vektör olarak çarpıldığında, sistemin prizmatik mafsallarına ait ivme ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

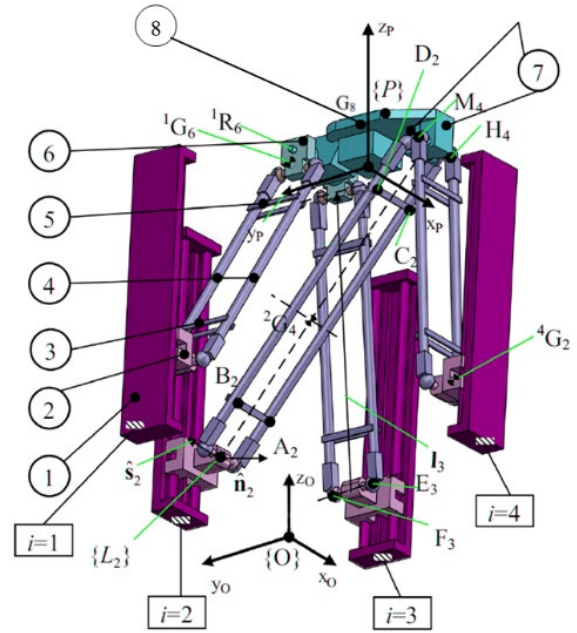
$$\ddot{d}_i = \frac{1}{\hat{d}_i \cdot l_i} \left\{ \begin{aligned} & (\ddot{p} + \ddot{\theta} \hat{i} \times b_i + \dot{\theta}^2 ((\hat{i} \cdot b_i) \hat{i} - b_i)) \cdot l_i \\ & - (\omega_{li} \cdot l_i)^2 + (\|\omega_{li}\| l_i)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 3.3. Dinamik Analizi

#### 3.3.1. Ters dinamik

Bilindiği üzere herhangi bir mekanizmanın ters dinamik analizinin temel amacı, mekanizmaya ait uç işlevcinin belirli bir yörüngeyi doğru bir şekilde takip edebilmesi için gerekli olan çalıştırma kuvvetlerinin veya torklarının belirlenmesidir [18]. Temel olarak, bu

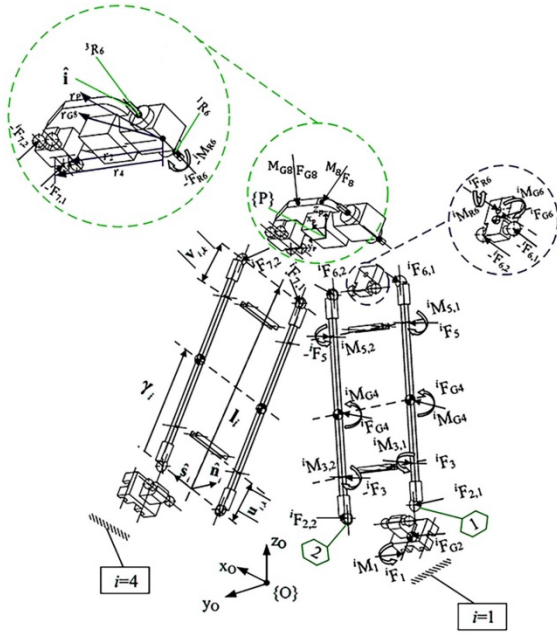
kuvvetler veya torklar, matematiksel olarak sisteme ait eklemlerin konumuna, hızına, ivmesine ve aynı zamanda hareketli platformun konumuna bağlı olan bir fonksiyon olarak kabul edilmektedir. Tasarımı yapılan sistemin analitik dinamik modeli Euler yöntemiyle türetilmiştir. Bu çalışmada Euler yönteminin tercih edilmesinin sebebi, reaksiyon kuvvetlerini dikkate almaması ve böylece sistem konum kontrolünde gerekli olan kontrolcüler için hızlıca hesaplanabilir bir dinamik modelin elde edilebilmesine olanak sağlamasıdır [19-23]. Her bir kinematik zincir için kullanılacak olan Euler metodunda, her bir bağ, bir rijit cisim olarak kabul edilmektedir. Bu bağların analizleri ayrı ayrı yapılarak daha sonra birleştirilebilmektedir. Bu sayede bacaklar arasında meydana gelen kuvvet veya tork ifadeleri rahatlıkla ortaya koyulabilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada her bir kinematik zincirin paralelkenarından başlanarak hareketli tablaya kadar bağlantıları tek tek analiz edilmiştir.



Şekil 4. Mekanizmanın serbest çizim diyagramı.

Şekil 4'te dinamik modellemeye kullanılan mekanizmanın ve geometrik indekslerin, 3 boyutlu bir görünümünü göstermektedir. Euler yöntemine göre her bir bacak tek tek analiz edileceğinden, bu bacakların her birine kendi lokal koordinat sistemi yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle her bir paralelkenar yapısına  $\{L_i\}$  ile tanımlanan lokal koordinat çerçeveleri yerleştirilmiştir. Şekil 4'te gösterilen  $A_i, B_i, C_i$  ve  $D_i$  her bir zincir için

konektörlerin ve paralelkenarların bağlantı noktasını temsil etmektedir. Ayrıca  $E_i$  ve  $D_i$  noktaları, paralelkenarın mekanizmada kullanılan arabalara montelenmesi için kullanılan küresel mafsalların merkez noktalarını ifade ederken,  $G_i$  ve  $M_i$  noktaları, paralelkenarın yine mekanizmada kullanılan hareketli tablaya bağlantısını gerçekleştirebilmek için kullanılan eklerin merkezini temsil etmektedir. Şekil 4'te, 1'den 8'e kadar yuvarlak içine alınan rakamlar, birbirinden bağımsız kinematik zincirlerin her bir bileşenini göstermek için kullanılmıştır. Bununla birlikte,  $G_j^i$  her bir elemanın kütle merkezini ifade etmekte olup burada üst  $i$  simgesi zincir numarasını temsil ederken, alt  $j$  simgesi eleman numarasını temsil etmektedir. Şekil 5'te tasarımı tamamlanan mekanizmanın dinamik analizinde kullanılacak olan ayrıntılı serbest cisim diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5. Mekanizmanın ayrıntılı serbest cisim diyagramı

Mekanizmada kullanılan 1. ve 3. aynı zamanda 4. ve 2. kinematik zincirler benzer olduğundan Şekil 5'te sadece 1. ve 4. kinematik zincir ve bu kinematik zincirlere etki eden kuvvet ve torklar ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 5'te gösterilen  ${}^iF_{j,k}$  ( $j=2,6,7$ ), küresel mafsallardan her bir paralelkenar bacağına etki eden kuvveti temsil etmektedir. Burada üst indis  $i$ , kinematik zincir sayısını, alt indis  $j$ , eleman sayısını ve  $k$  ise paralelkenar bacaklarında bağlantı için kullanılan mafsalsayısını ifade etmektedir. Benzer şekilde,

${}^iF_{j,k}$ ,  ${}^iM_{j,k}$  ( $j=3, 5$ ), mekanizmada kullanılan konektörler aracılığıyla paralelkenar bağlantılarına uygulanan kuvvet ve torkları,  ${}^iF_{G_j}$ ,  ${}^iM_{G_j}$  her bir bağlantı bileşenlerinin kütle merkezine uygulanan kuvvet ve torkları,  ${}^iF_{R_j}$ ,  ${}^iM_{R_j}$  ( $j=6$ ) ise dönen mafsallarda meydana gelen kuvvet ve torkları ifade etmektedir. Ayrıca, Şekil 5'te gösterilen  $u_{i,k}$ ,  $v_{i,k}$  paralelkenarların bağlantı noktaları olan  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  ve  $D_i$ 'ye doğru uzanan vektörleri temsil ederken  $\gamma_i$  ifadesi, küresel mafsallardan her bir paralelkenar bacağına kütle merkezine doğru uzanan vektörü temsil etmektedir. Bilindiği üzere  $\sum M_o = I_o\alpha + \omega \times I_o\omega$  şeklinde ifade edilen Euler eşitliği kullanılarak mekanizmanın global koordinat sistemi, orijinine göre tüm kuvvet ve torklar tanımlanabilmektedir. Bunun için önce, her paralelkenarın  $E_i$  ve  $F_i$  noktaları etrafındaki iki bağlantısının ( $k=1,2$ ) moment dengesi dikkate alınır ve ardından, bunların  $\hat{n}_i$  eksenini boyunca yansıtılan ifadeleri tanımlanmaktadır. Bu durumun matematiksel ifadesi Denklem (11) ve Denklem (12)'de gibidir.

$$\begin{pmatrix} u_{i,1} \times {}^iF_3 + \gamma_i \times {}^iF_{G_4} + v_{i,1} \times {}^iF_5 \\ + L_i \times {}^iF_{6,1} + {}^iM_{G_4} \end{pmatrix} \cdot \hat{n}_i + ({}^iM_{3,1} + {}^iM_{5,1}) \cdot \hat{n}_i = 0 \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} -u_{i,2} \times {}^iF_3 + \gamma_i \times {}^iF_{G_4} - v_{i,2} \times {}^iF_5 + L_i \times {}^iF_{6,2} \\ + M_{G_4} \end{pmatrix} \cdot \hat{n}_i + ({}^iM_{3,2} + {}^iM_{5,2}) \cdot \hat{n}_i = 0 \quad (12)$$

Denklem (11) ve Denklem (12)'de ifade edilen  ${}^iF_{G_4}$  ve  ${}^iM_{G_4}$  Denklem (13) ve Denklem (14)'de gibi tanımlanmaktadır.

$${}^iF_{G_4} = m_i(g - {}^i a_i) \quad (13)$$

$${}^iM_{G_4} = -\{\omega_i \times (I_{o,i}\omega_i) + I_{o,i}\dot{\omega}_i\} \quad (14)$$

Burada  $g$ , yerçekimi ivmesini,  $m_i$ , paralelkenarın bacağına kütle kümesini ve  $I_{o,i} = ({}^oT_i)(I_{L_i})({}^oT_i^T)$  ise global referans çerçevesinde ve global çerçevenin orijinine ifade edilen paralelkenarın atalet matrisini temsil etmektedir.  $I_{L_i} = I_{G_i} + m_i\|L_i\|^2 \text{diag}(0,1,1)$  ifadesi, Şekil 3'te gösterilen global referans koordinat sisteminin orijine göre paralelkenarın atalet matrisi olup,

${}^0L_i T_i = \begin{bmatrix} \frac{L_i}{\|L_i\|} & \hat{n}_i \times \frac{L_i}{\|L_i\|} & \hat{n}_i \end{bmatrix}$ ,  $i = 1, \dots, 4$  ise global koordinat sistemine göre  $\{L_i\}$  bacağı üzerine yerleştirilen lokal koordinat sisteminin dönüşüm matrisini ifade etmektedir. Denklem (1) ve Denklem (2)'nin matematiksel olarak toplanması ve aynı zamanda sistemde bulunan bacakların döner mafsallar yardımıyla sisteme bağlandığı düşünüldüğünde, bir başka ifadeyle,  ${}^iM_{3,k} \cdot \hat{n} = {}^iM_{5,k} \cdot \hat{n} = 0$ ,  $k = 1, 2$  ile ifade edilen ilişki göz önüne alındığında, Denklem (15) ile ifade edilen bağıntı elde edilebilmektedir.

$$(L_i \times \hat{n}_i) \cdot ({}^iF_{6,1} + {}^iF_{6,2}) = 2(\gamma_i \times {}^iF_{G_4} + {}^iM_{G_4}) \cdot \hat{n}_i \quad (15)$$

Ayrıca, paralelkenarlara bağlı lokal koordinat sisteminin  $\hat{s}_i$  eksenı boyunca  $E_i, F_i$  etrafındaki moment bileşenlerinin denge durumu dikkate alındığında, Denklem (16) elde edilebilmektedir.

$$(L_i \times ({}^iF_{6,1} + {}^iF_{6,2})) \cdot \hat{s}_i + 2(\gamma_i \times {}^iF_{G_4} + {}^iM_{G_4}) \cdot \hat{s}_i = 0 \quad (16)$$

Vektörel özdeşliklerden biri olan  $(a \times b) \cdot c = (c \times a) \cdot b$  ilişkisi kullanıldığında, Denklem (16), Denklem (17)'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$(L_i \times \hat{s}_i) \cdot ({}^iF_{6,1} + {}^iF_{6,2}) = 2(\gamma_i \times {}^iF_{G_4} + {}^iM_{G_4}) \cdot \hat{s}_i \quad (17)$$

Denklem (15) ve Denklem (17)'de elde edilen ifadeler her bir kinematik zincirin paralelkenarlarının tüm kolları için yazılarak aşağıdaki denklem sistemleri elde edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} N \\ S \end{bmatrix}_{8 \times 12} \begin{bmatrix} 1F_{6,1} + 1F_{6,2} \\ \vdots \\ 4F_{6,1} + 4F_{6,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_N \\ R_S \end{bmatrix} \quad (18)$$

Burada,  $N, S, R_N$  ve  $R_S$  sırasıyla Denklem (19), Denklem (20), Denklem (21) ve Denklem (22) ile ifade edilmektedir.

$$N = \begin{bmatrix} (L_1 \times \hat{n}_1)^T & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & (L_4 \times \hat{n}_4)^T \end{bmatrix}_{4 \times 12} \quad (19)$$

$$S = \begin{bmatrix} (L_1 \times \hat{s}_1) & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & (L_4 \times \hat{s}_4) \end{bmatrix}_{4 \times 12} \quad (20)$$

$$R_N = 2 \begin{bmatrix} (\gamma_1 \times {}^1F_{G_4} + {}^1M_{G_4}) \cdot \hat{n}_1 \\ \vdots \\ (\gamma_4 \times {}^4F_{G_4} + {}^4M_{G_4}) \cdot \hat{n}_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$R_S = 2 \begin{bmatrix} (\gamma_1 \times {}^1F_{G_4} + {}^1M_{G_4}) \cdot \hat{s}_1 \\ \vdots \\ (\gamma_4 \times {}^4F_{G_4} + {}^4M_{G_4}) \cdot \hat{s}_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Sisteme ait dinamik modeli elde edebilmek için bir sonraki adım ise, Şekil 2' de gösterilen ve sistemin üst hareketli platformu üzerinde bulunan konnektörlere etkiyen kuvvetleri ve momentleri ifade etmektir. Bunun için, Şekil 5 göz önüne alınarak, hareketli platforma etki eden kuvvet toplamları Denklem (23) ile ifade edilebilmektedir.

$${}^iF_{R_6} = {}^iF_{6,1} + {}^iF_{6,2} - {}^iF_{G_6}, \quad i = 1, 3 \quad (23)$$

Burada,  ${}^iF_{R_6}$  döner mafsallardan konnektöre uygulanan kuvvetleri temsil etmekte olup Denklem (24)'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$${}^iF_{G_6} = m_6(g - {}^i a_{con}), \quad i = 1, 3 \quad (24)$$

Benzer şekilde Şekil 5'de sunulan serbest cisim diyagramına göre  ${}^1R_6$  ve  ${}^3R_6$ 'dan geçen eksen etrafındaki moment bileşenleri denge denklemi Denklem (25)'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} & (r_4 \times ({}^4F_{7,1} + {}^4F_{7,2})) \cdot \hat{i} + \\ & (r_2 \times ({}^2F_{7,1} + {}^2F_{7,2})) \cdot \hat{i} \\ & = (r_{G_8} \times F_{G_8}) \cdot \hat{i} + M_{G_8} \cdot \hat{i} \\ & + (r_P \times F_8) \cdot \hat{i} + M_8 \cdot \hat{i} - {}^1M_{R_6} \cdot \hat{i} - {}^3M_{R_6} \cdot \hat{i} \end{aligned} \quad (25)$$

Burada  ${}^iM_{R_6}$ ,  $i = 1, 3$  konnektörlerin döner ekleminde hareketli platforma uygulanan momentleri,  $F_8$  ve  $M_8$  sırasıyla hareketli platforma uygulanan dış kuvvet ve momentleri temsil etmekte olup, bu kuvvet ve momentlerin açık ifadeleri Denklem (26) ve Denklem (28)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$F_{G_8} = m_8(g - a_{CP}) \quad (26)$$

$$M_{G_8} = -\{\dot{\theta}^2 \hat{i} \times (I_{G_8} \hat{i}) + \ddot{\theta} I_{G_8} \hat{i}\} \quad (27)$$

${}^iM_{R_6}$ ,  $i = 1,3$ 'ün  $\hat{i}$  boyunca herhangi bir bileşeni olmadığı gerçeği göz önüne alındığında, bir başka deyişle,  ${}^1M_{R_6} \cdot \hat{i} = {}^3M_{R_6} \cdot \hat{i} = 0$  ilişkisi dikkate alındığında, Denklem (25), aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} & (\hat{i} \times r_4) \cdot ({}^4F_{7,1} + {}^4F_{7,2}) + (\hat{i} \times r_2) \\ & \quad \cdot ({}^2F_{7,1} + {}^2F_{7,2}) \\ & = (r_{G_8} \times F_{G_8} + M_{G_8} + r_P \times F_8 + M_8) \cdot \hat{i} \end{aligned} \quad (28)$$

Ayrıca hareketli platforma etki eden kuvvetlerin toplamı Denklem (29)'da yazıldığı gibi tanımlanabilmektedir.

$$\begin{aligned} & ({}^4F_{7,1} + {}^4F_{7,2}) + ({}^2F_{7,1} + {}^2F_{7,2}) + {}^1F_{R_6} + {}^2F_{R_6} \\ & = F_{G_8} + F_8 \end{aligned} \quad (29)$$

Denklem (23)'de ifade edilen  ${}^iF_{R_6}$ ,  $i = 1,3$ , Denklem (26)'da yerine yazıldığında, Denklem (30) elde edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} & ({}^1F_{6,1} + {}^1F_{6,2}) + ({}^2F_{7,1} + {}^2F_{7,2}) + ({}^3F_{6,1} + {}^3F_{6,2}) \\ & + ({}^4F_{7,1} + {}^4F_{7,2}) = {}^1F_{G_6} + {}^3F_{G_6} + F_{G_8} + F_8 \end{aligned} \quad (30)$$

Denklem 18, 28 ve 30 kullanılarak matris formunda kuvvet eşitliği, Denklem (31)'deki ifade tanımlanabilmektedir.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} {}^1F_{6,1} + {}^1F_{6,2} \\ {}^2F_{7,1} + {}^2F_{7,2} \\ {}^3F_{6,1} + {}^3F_{6,2} \\ {}^4F_{7,1} + {}^4F_{7,2} \end{bmatrix} = \Gamma^{-1}\Psi = \\ & = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0 & (\hat{i} \times r_2)^T & 0 & (\hat{i} \times r_4)^T \\ & N & & \\ & S & & \\ & {}^1F_{G_6} + {}^3F_{G_6} + F_{G_8} + F_9 & & \\ & (r_{G_8} \times F_{G_8} + M_{G_8} + r_P \times F_8 + M_8) \cdot \hat{i} & & \\ & R_N & & \\ & R_S & & \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

Son olarak mekanizmada kullanılan arabaların ve paralelkenarların tek bir rijit cisim olarak kabul edilmesiyle, bunlara etki eden kuvvetlerin toplam ifadesi aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} & {}^iF_1 = -\{{}^iF_{G_2} + 2{}^iF_{G_4} + ({}^iF_{j,1} + {}^iF_{j,1})\}, j \\ & \quad = 6 \text{ for } i \\ & \quad = 1,3 \text{ and } j = 7 \text{ for } i = 2,4 \end{aligned} \quad (32)$$

Burada  ${}^iF_1$ , mekanizmada kullanılan rayların arabaya uyguladığı kuvvetlerdir. Denklemde yer alan  $F_{G_2}$  kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$${}^iF_{G_2} = m_2(g - \ddot{d}_i \hat{d}_i) \quad (33)$$

Burada  $m_2$  arabanın kütesidir. Bu durumda sisteme etki eden ve  $\hat{d}_i$  vektörü boyunca uzanan  ${}^iF_1$  kuvvetinin değeri, yani,  $f_a$  kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$${}^i f_a = {}^i F_1 \cdot \hat{d}_i \quad (34)$$

Tek tek gerçekleştirilen bu analizlerin ardından elde edilen Denklem (31), Denklem (32) ve Denklem (34)'e göre, sisteme ait ters dinamik modelinin matris formu, Denklem (35)'deki gibi ifade edilirken, bu denklem kontrol teorisinde kullanılan standart formda ise Denklem (36)'daki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} {}^1 f_a \\ \vdots \\ {}^4 f_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1^T & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \hat{d}_4^T \end{bmatrix} \left[ \Gamma^{-1}\Psi + \begin{bmatrix} {}^1F_{G_2} + 2({}^1F_{G_4}) \\ \vdots \\ {}^4F_{G_2} + 2({}^4F_{G_4}) \end{bmatrix} \right] \quad (35)$$

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (36)$$

### 3.3.2. 3D yazıcıda kullanılan adım motorlarının dinamik modellemesi

Tasarımı tamamlanan 5 eksenli 3D yazıcının tanımlanan bir yörüngeyi gerçekleştirebilmesi için, sistemde kullanılan eyleyicilerin belirli bir hızda ve açıda hassas bir şekilde hareket ettirilmesi gerekmektedir. Proje kapsamında tasarlanan sistemde, beş adet hibrid adım motoru kullanılmış olup bu motorların matematiksel analizini yapabilmek için teoride tam bir elektromekanik eşdeğer model bulunamamaktadır. Bu motorlara ait dinamik modeli ortaya koyabilmek için elektromekanik eşdeğer devre yerine manyetik eşdeğer devre modelinden yararlanılmaktadır [24-26]. Manyetik eşdeğer devre modeli kullanılarak bir adım motorunun fazlarına ait elektriksel eşitlikler, Denklem (37)-(38)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$U_a = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a - K_m \omega \sin(p\theta) \quad (37)$$

$$U_b = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b - K_m \omega \cos(p\theta) \quad (38)$$

Burada ifade edilen  $i_a, U_a, i_b$  ve  $U_b$  terimleri sırasıyla, A ve B fazlarına uygulanan kontrol akımlarını ve buna bağlı ortaya çıkan faz gerilimleri ifade etmektedir. Bununla birlikte R ve L motorların fazlarına ait direnç ve induktans değerlerinin,  $K_m$  motor tork sabitini,  $\omega$  ve  $\theta$  motorun açısal hız ve konumu,  $p$  ise adım motorunun rotor diş sayısını ifade etmektedir. Tasarlanan sistemin mekanik yapısı gereği  $\theta$  ile ifade edilen motorun açısal konumu, Denklem (35)'de  $d_i^T$  ile tanımlanan doğrusal konum ile ilişkilidir.

Kontrol akımı tarafından belirlenen motorun çıkış torku aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_m \{-i_a \sin(p\theta) + i_b \cos(p\theta)\} - T_L \quad (39)$$

$$= J \frac{d\omega}{dt} + K_v \omega$$

Burada ifade edilen  $J, K_v$  ve  $T_L$  sırasıyla motor milinin ataletini, viskoz sönümlenme katsayısını ve motor miline uygulanan yük torkunu ifade etmektedir. Denklem (36), Denklem (37), Denklem (38) ve Denklem (39)'da ifade edilen gerilim ve tork denklemlerine Park dönüşümü uygulandığında,  $d-q$  eksenlerinde tanımlı gerilim ve tork ifadeleri Denklem (40)'daki gibi elde edilmektedir.

$$U_d = R i_d + L \frac{d}{dt} i_d - L p \omega i_q$$

$$U_q = R i_q + L \frac{d}{dt} i_q - L p \omega i_d + K_m \omega \quad (40)$$

$$T_{motor} = K_m i_q - J \frac{d\omega}{dt} - K_v \omega$$

Denklem (40)'da elde edilen motor çıkış torku ifadesi mekanik sisteme ait ters dinamik denkleme eşitlendiğinde tüm sisteme ait dinamik eşitlik Denklem (41)'deki gibi elde edilmektedir.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = K_m i_q - J\ddot{\omega} - K_v \dot{\omega} \quad (41)$$

Denklem (41)'de matematiksel işlemler yapıldığında, Denklem (41) yeniden Denklem (42)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$(M(q) - J)\ddot{q} + (C(q, \dot{q}) + K_v)\dot{q} + G(q) = K_m i_q \quad (42)$$

Denklem (42) daha basit bir gösterimle Denklem (43)'deki gibi ifade edilebilir;

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = K_m i_q = \tau(t) \quad (43)$$

Burada  $N(q, \dot{q}) = (C(q, \dot{q}) + K_v)\dot{q} + G(q)$  dir.

#### 4. PID KONTROL TEKNİĞİ

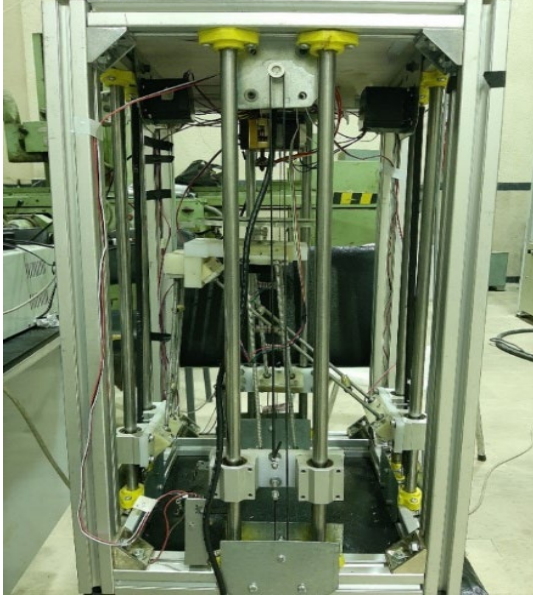
PID kontrol tekniği endüstriyel sistemlerin kontrol edilmesinde kullanılan ve geri besleme döngüsüne sahip bir kontrol yöntemidir. Bir PID denetleyicinin arkasındaki en temel fikir, bir sensör verisini okumak, ardından orantısal, integral ve türev yanıtlarını hesaplayarak aktüatör için en uygun kontrol işaretini üretmektir [27]. Bu kapsamda PID kontrolcüsünün matematiksel ifadesi en genel haliyle Denklem (44)'teki gibi tanımlanır. Denklem (44);  $u(t)$  kontrol sinyalini temsil etmektedir. Hata gösterim olarak  $e(t)$  ifadesi kullanılmıştır. Set noktası ile gerçek sürecin (prosesin) çıkışı arasındaki fark başka bir değişle  $r(t)$  referans arzu edilen değer,  $y(t)$  sistemin çıkışı olmak üzere;  $e(t) = r(t) - y(t)$  şeklindedir.

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt + k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (44)$$

$k_p$  oransal katsayıdır ve hatanın doğrudan çıkışa olan oransal etkisini,  $k_i$  integral katsayısıdır ve hatanın zaman içindeki toplamını,  $k_d$  türev katsayısıdır ve hata değişiminin çıkışa olan etkisini kontrol etmektedir.  $\int_0^t e(t) dt$  hatanın zaman içindeki toplamını ifade eder. Bu denklem, PID kontrolcüsünün çıkışını belirler ve sürecin istenen set noktasına en hızlı ve düşük hatayla ulaşmasını sağlamak için hatanın anlık değeri, zaman içindeki toplamı ve değişiminin birleşimini hesaplar.  $k_p, k_i$  ve  $k_d$  katsayıları, kontrolcünün performansını ayarlamak için kullanılmaktadır.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

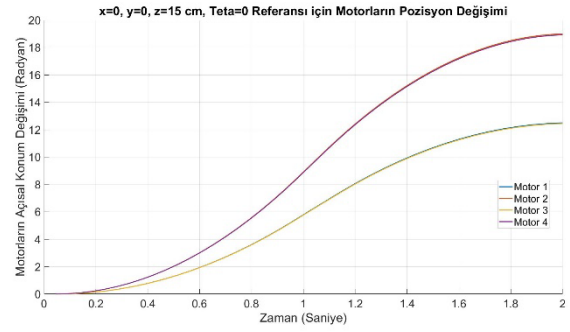
Paralel kinematik yapıya sahip 5 serbestlik dereceli robotik sistemin konsept dizaynı Şekil 6' da gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasarımı tamamlanan 3D yazıcı.

Tasarımı tamamlanan sistemin çalışma performansını değerlendirmek için öncelikle sistemde bulunan 4 ayrı adım motorunun kinematik denklemlere ve geliştirilen kontrol algoritmasına göre, bağlı buldukları hareketli tabla için, tanımlanan referans öteleme ve dönme hareket performans testleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hareketli tablanın  $x = 0, y = 0, z = 0$  ve  $\theta = 0$  başlangıç koordinatından  $x = 0, y = 0, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referans koordinatına, 2 saniyede gitmesi hedeflenmiştir. Bir başka ifadeyle hareketli tablanın herhangi bir yönelim yapmadan  $z$  koordinatında 15 cm yukarı doğru hareket etmesi amaçlanmıştır. Söz konusu bu referansın sistem tarafından gerçekleştirilebilmesi için sistemin kinematik denklemlerine göre 1. ve 3. motorların 12,54 radyan açısız konum değerinde sağa doğru dönüş yapması ve 2. ve 4. motorların ise 19,32 radyan açısız konum değerinde sağa doğru dönüş yapması gerekmektedir. Kinematik analize göre 1. ve 3. motorların 2. ve 4. motorlara göre daha az dönüş yapmasının nedeni, 2. ve 4. motorların hareketli tablaya olan bağlantı noktalarının 1 ve 3 göre farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan deneysel sonuçları göre motorların açısız konum değişimleri Şekil 7'de sunulmuştur.

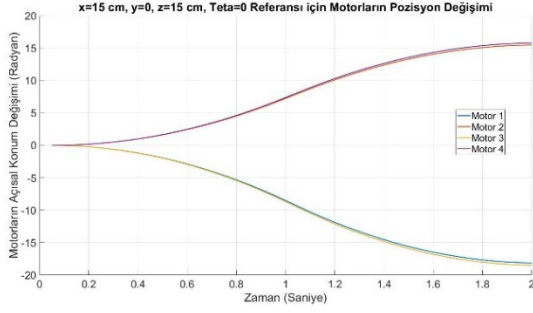
Şekil 7 incelendiğinde, söz konusu motorların 2 saniyede ivmeli hareket yaparak ve hedeflenen açısız konumlardan sapmadan düzgün bir şekilde referans değerlere vardığı görülmektedir. PID kontrolcüsü sayesinde sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. motorlarda meydana gelen son durum kalıcı hata değerleri, 0,02, 0,03, 0,01 ve 0,035 radyan olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.  $x = 0, y = 0, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referansı için motorların pozisyon değişimi.

Bir başka referans değer olarak, hareketli tablanın  $x = 0, y = 0, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  başlangıç koordinatından  $x = 15 \text{ cm}, y = 0, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referans koordinatına 2 saniyede gitmesi hedeflenmiştir. Bir başka ifadeyle hareketli tablanın herhangi bir yönelim yapmadan  $z=15 \text{ cm}$  yüksekliğinde sadece  $x$  ekseninde 15 cm sağa doğru hareket etmesi amaçlanmıştır. Söz konusu bu referansın sistem tarafından gerçekleştirilebilmesi için sistemin kinematik denklemlerine göre, 1. ve 3. motorların -18,23 radyan açısız konum değerinde sola doğru dönüş yapması ve 2. ve 4. motorların ise 15,87 radyan açısız konum değerinde sağa doğru dönüş yapması gerekmektedir. Yapılan deneysel sonuçlara göre motorların açısız konum değişimleri Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, söz konusu motorların 2 saniyede ivmeli hareket yaparak ve hedeflenen açısız konumlardan sapmadan düzgün bir şekilde referanslara vardığı görülmektedir. Bu çalışmada ise 1., 2., 3. ve 4. motorlarda meydana gelen son durum kalıcı hata değerleri -0,015, -0,025, 0,02 ve 0,03 radyan olarak elde edilmiştir.



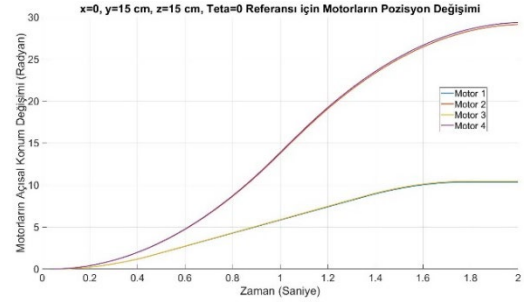


**Şekil 8.**  $x = 15 \text{ cm}$ ,  $y = 0$ ,  $z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referansı için motorların pozisyon değişimi.

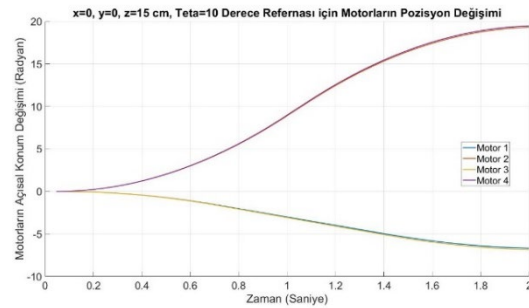
Benzer şekilde, hareketli tablanın  $x = 0, y = 0, z = 15$  ve  $\theta = 0$  başlangıç koordinatından  $x = 0, y = 15 \text{ cm}, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referans koordinatına 2 saniyede gitmesi hedeflenmiştir. Bir başka ifadeyle hareketli tablanın herhangi bir yönelim yapmadan  $z = 15 \text{ cm}$  yüksekliğinde sadece  $y$  ekseninde  $15 \text{ cm}$  sağa doğru hareket etmesi amaçlanmıştır. Söz konusu bu referansın sistem tarafından gerçekleştirilebilmesi için sistemin kinematik denklemlerine göre 1. ve 3. motorların  $11,45$  radyan açısal konum değerinde sağa doğru dönüş yapması ve 2. ve 4. motorların ise  $28,11$  radyan açısal konum değerinde sağa doğru dönüş yapması gerekmektedir. Yapılan deneysel sonuçları göre motorların açısal konum değişimleri Şekil 9’ de sunulmuştur. Şekil 9 incelendiğinde söz konusu motorların, 2 saniyede ivmeli hareket yaparak ve hedeflenen açısal konumlardan sapmadan düzgün bir şekilde referans değerlere küçük bir hata değeri ile vardığı görülmektedir. PID kontrolcüsü sayesinde sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. motorlarda meydana gelen son durum kalıcı hata değerleri  $0,015$ ,  $0,028$ ,  $0,015$  ve  $0,035$  radyan olarak elde edilmiştir.

Son olarak, hareketli tablanın  $x = 0, y = 0, z = 15$  ve  $\theta = 0$  başlangıç koordinatından  $x = 0, y = 0, z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 10^0$  referans yönelimini 2 saniyede yapması hedeflenmiştir. Bir başka ifadeyle hareketli tablanın herhangi bir öteleme hareketi yapmadan sadece  $x$  eksen etrafında  $10$  derece sağa doğru dönmesi amaçlanmıştır. Söz konusu bu referansın sistem tarafından gerçekleştirilebilmesi için sistemin kinematik denklemlerine göre 1. ve 3. motorların  $-7,21$  radyan açısal konum değerinde sola doğru dönüş yapması ve 2. ve 4. motorların ise  $19,15$  radyan açısal konum değerinde sağa doğru dönüş yapması

gerekmektedir. Yapılan deneysel sonuçları göre motorların açısal konum değişimleri Şekil 10’da sunulmuştur. Şekil 10 incelendiğinde, söz konusu motorların 2 saniyede ivmeli hareket yaparak ve hedeflenen açısal konumlardan sapmadan düzgün bir şekilde referans değerlere vardığı görülmektedir. Bu son deneyde ise, 1., 2., 3. ve 4. motorlarda meydana gelen son durum kalıcı hata değerleri  $-0,017$ ,  $-0,026$ ,  $0,024$  ve  $0,033$  radyan olarak elde edilmiştir.



**Şekil 9.**  $x = 0$ ,  $y = 15 \text{ cm}$ ,  $z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 0$  referansı için motorların pozisyon değişimi.



**Şekil 10.**  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 15 \text{ cm}$  ve  $\theta = 10^0$  referansı için motorların pozisyon değişimi.

Sistemin referans öteleme ve dönme hareketleri için yapılan performans deneylerinden edinilen sonuçlara göre tasarlanan sistem için yapılan tüm kinematik analizlerin doğru olduğu ispatlanmış ve geliştirilen kontrol algoritmasının da iyi bir performansta çalıştığı görülmüştür. Yapılan kinematik analizler, MATLAB yazılımı üzerinde gerçekleştirilen sistem performans testleri, tasarımın beklenen performansı sergilediğini göstermektedir. Kontrol algoritması, hareketli tablanın belirlenen referans öteleme ve dönme hareketleri için başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Sistemin hem mekanik hem de elektriksel bileşenleri içeren konsept tasarımı, klasik diğer sistemlere kıyasla üretim maliyetlerini azaltabilen, daha hassas ve yüksek iş hızına çıkabilme potansiyeli taşımaktadır.

## 6. SONUÇLAR

Literatüre sunulan paralel kinematik yapıya sahip 5 serbestlik dereceli robotik sistem, eklemeli imalat teknolojisine yapılan önemli bir katkı olarak değerlendirilmektedir. Paralel kinematik yapısı, daha yüksek doğruluk ve işleme hızı sunma potansiyeliyle öne çıkan sistemde, X ve Z eksenlerindeki dönme hareketleri, ürünlerin daha karmaşık geometrilerinin üretimini mümkün kılarak endüstri uygulamaları için çeşitli olanaklar sunacaktır. Bu tasarımın, endüstriyel üretime potansiyel katkıları arasında, ürün kalitesindeki artış, üretim süreçlerindeki hızlanma ve daha karmaşık parçaların üretimindeki kolaylık bulunmaktadır. Ayrıca, daha fazla serbestlik derecesi sayesinde tasarımcılara ve mühendislere daha esnek bir üretim ortamı sağlanmaktadır. Ancak, bu yeni tasarımın ticarileşmesi ve endüstriyel ölçekte kullanılabilirliği için daha fazla araştırma ve çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, sisteme 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan nozzle yapısı eklenerek sistemin performans testleri gerçekleştirilmelidir. Sistem üzerindeki çalışmalar devam etmekte olup ilerleyen süreçlerde sistemin üretim performansı üzerine yeni çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Ayrıca geliştirilecek yeni kontrol teknikleri ile sistem kontrol performansı karşılaştırılmalı olarak sunulması hedeflenmektedir. Bununla birlikte, tasarımın geniş bir endüstri uygulamasına uygunluğu ve diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırılabilirliği de araştırılacaktır.

## TEŞEKKÜR

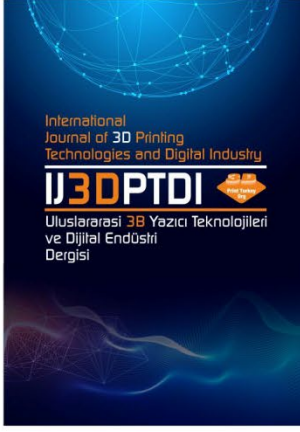
Bu çalışma TÜBİTAK 119N707 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. L. Li, A. Haghghi, ve Y. Yang, "A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 33, Pages 150-160, 2018.
2. S. Çaçka, K. Gök, M. Aydın, ve İ. Özdemir, "Finite Element Method Based Structural Analysis Of Quadcopter Uav Chassis Produced With 3d Printer", *DPÜFBED*, Issue 044, Art. Issue 044, 2020.
3. P. Urhal, A. Weightman, C. Diver, ve P. Bartolo, "Robot assisted additive manufacturing: A review", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 59, Pages 335-345, 2019.

4. W. Guo, R. Li, C. Cao, ve Y. Gao, "Kinematics, dynamics, and control system of a new 5-degree-of-freedom hybrid robot manipulator", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8, 2016.
5. M. Mahboubkhah ve A. Barari, "Design and development of a novel 4-DOF parallel kinematic coordinate measuring machine (CMM)", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 32, Pages 1-11, Nis. 2019.
6. F. Xie ve X.-J. Liu, "Analysis of the kinematic characteristics of a high-speed parallel robot with Schönflies motion: Mobility, kinematics, and singularity", *Front. Mech. Eng.*, Vol. 11, Issue 2, Pages 135-143, Haz. 2016.
7. S. Krut, V. Nabat, ve F. Pierrot, "HELI4: a Parallel Robot for SCARA Motions with a Very Compact Travelling Plate and a Symmetrical Design", program adı: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Eki. 2006.
8. S. Krut ve F. Pierrot, "Modelling of a 4 Axis Parallel Machine for Heavy Parts Handling", içinde *Parallel Kinematics Seminar*, Verlag Scripten, s. pp-151, 2002.
9. V. Nabat, M. de la O RODRIGUEZ, O. Company, S. Krut, ve F. Pierrot, "Par4: very high speed parallel robot for pick-and-place", içinde *2005 IEEE/RSJ International Conference on intelligent robots and systems, IEEE*, Pages 553-558, 2005.
10. J. Zhang ve F. Liou, "Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process", *J. Mech. Des.*, Vol. 126, Issue 2, Pages 254-261, 2004.
11. R. Clavel, "Unmanned robotic delta weapon platform", *WIPO patent*, 1987.
12. F. Pierrot ve O. Company, "H4: a new family of 4-dof parallel robots", içinde *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No. 99TH8399)*, IEEE, Pages 508-513, 1999.
13. Denavit, J., Hartenberg, R. S., "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices", *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 77, Pages 215-221, 1955.
14. Chase, M. A., "Vector analysis of linkages", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 85, Pages 289-297, 1963.

15. Duffy, J., Rooney, J., “A foundation for a unified theory of analysis of spatial mechanism”, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 97, Issue 4, Pages 1159-1164, 1975.
16. Nanua, P., Waldron, K. J., Murthy, V., “Direct kinematic solution of a Stewart platform”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, Issue 4, Pages 438-444, 1990.
17. Su, Y. X., Zang, C. H. and Duan B.Y., “Singularity analysis of a 6 DOF stewart platform using genetic algorithm”, IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Yasmine Hammamet, Pages 1-6, 2002.
18. L.W. Tsai, “Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, John Wiley & Sons, 1999.
19. Pedrammehr, S., Mahboubkhah, M. & Khani, “N. Improved dynamic equations for the generally configured Stewart platform manipulator”, J Mech Sci Technol Vol.26, Pages 711–721, 2012.
20. S. Pakzad, S. Akhbari, ve M. Mahboubkhah, “Kinematic and dynamic analyses of a novel 4-DOF parallel mechanism”, J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., Vol. 41, Issue 12, Pages 561, Ara. 2019.
21. Craig, J. J., “Introduction to Robotics: Mechanics and Control”, Pages 19-339, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2005.
22. Spong, M. W., Vidyasagar, M., “Robot dynamics and control”, Pages 26-138, Wiley, Hoboken, 2008.
23. Jazar, R.N., “Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control”, Pages 35-554, Springer, Berlin, 2010.
24. Matsu, N., Nakomura M., and Kosako T., “Instantaneous torque analysis of hybrid stepping motor”, IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 32, Issue 5, Pages 1176-1196, 1996.
25. Bellini, A., Conconi C., Franceschini G., and Toscani A., “Mixed-Mode PWM for high performance stepping motors”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, Issue 6, Pages 3167-3177, 2007.
26. Baluta G., and Coteata M., “Precision microstepping system for bipolar stepper motor control”, 07th International Elect. Mach. and Power Electronics Conference, Pages 291-296, Bodrum, 2007.
27. Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A., Powell, J. D., “Feedback control of dynamic systems”, Pages 202-211, Prentice hall, Upper Saddle River, 2002.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## ÖĞRETMENLERİN 3B YAZICI ÖĞRENME VE UYGULAMA DENEYİMLERİ

### 3D PRINTER LEARNING AND APPLYING EXPERIENCES OF TEACHERS

**Yazarlar (Authors):** Esra ŞAHBAZ , Hasan GÖKÇE , Hilal KARABULUT 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Şahbaz E., Gökçe H., Karabulut H., "Öğretmenlerin 3B Yazıcı Öğrenme ve Uygulama Deneyimleri" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 59-70, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1004949

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# ÖĞRETMENLERİN 3B YAZICI ÖĞRENME VE UYGULAMA DENEYİMLERİ

Esra ŞAHBAZ<sup>ID<sup>a</sup></sup>, Hasan GÖKÇE<sup>ID<sup>a</sup></sup>, Hilal KARABULUT<sup>ID<sup>a\*</sup></sup>

<sup>a</sup>MEB, Türkiye

\* Sorumlu Yazar: [hilalcoskun88@gmail.com](mailto:hilalcoskun88@gmail.com)

(Geliş/Received: 01.06.23; Düzeltme/Revised: 07.08.23; Kabul/Accepted: 15.08.23)

## ÖZ

Bu araştırmada, öğretmenlerin 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimlerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırmada, nitel araştırma desenlerinden olgu bilim tercih edilmiştir. Araştırma, İç Anadolu bölgesinin bir ilinde görev yapan ve 3B yazıcı eğitimi almış 6 öğretmen ile yürütülmüştür. Katılımcıların belirlenmesinde amaçlı örnekleme yöntemlerinden birisi olan ölçüt örnekleme yöntemi tercih edilmiştir. Örnekleme belirleme ölçütü ise öğretmenlerin 3B yazıcı eğitimi almış olmaları şeklinde belirlenmiştir. Araştırmada veri toplama aracı olarak görüşme formu kullanılmıştır. Yarı yapılandırılmış görüşme soruları araştırmacılar tarafından hazırlanmıştır. Araştırmada veriler içerik analizi ile çözümlenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen kod, kategori ve temalar belirlenerek bulgular tablolar halinde gösterilmiş ve tablo altında katılımcılara ilişkin doğrudan alıntılara yer verilmiştir. Araştırma sonuçları, öğretmenlerin 3B yazıcı eğitimleri ile birlikte 3B yazıcıların çalışma prensiplerini anladıklarını, bu eğitimlerle birlikte 3B yazıcıları derslere entegre edebileceklerini göstermiştir. Ayrıca, öğretmenler 3B yazıcılar ile ilgili verilen eğitimlerin branş bazlı olması, birebir deneyime izin vermesi ve küçük gruplarla yürütülmesi gerektiği şeklinde de önerilerde bulunmuşlardır.

**Anahtar Kelimeler:** 3D Yazıcı, Öğrenme ve Uygulama, Olgu Bilim.

## 3D PRINTER LEARNING AND APPLYING EXPERIENCES OF TEACHERS

### ABSTRACT

This research aimed to reveal teachers' 3D printer learning and applying experiences. In the research, phenomenology, one of the qualitative research designs, was preferred. The research was conducted with 6 teachers who worked in a province of the Central Anatolia region and received 3D printer training. Criterion sampling method, one of the purposeful sampling methods, was preferred in determining the participants. The criterion for determining the sample was that the teachers had received 3D printing training. An interview form was used as a data collection tool in the research. Semi-structured interview questions were prepared by the researchers. In the research, data were analyzed by content analysis. The codes, categories and themes obtained as a result of the analysis were determined and the findings were shown in tables and direct quotes from the participants were included under the table. Research results showed that teachers understood the working principles of 3D printers through 3D printer training and that they could integrate 3D printers into lessons with these trainings. In addition, teachers also made suggestions that the trainings on 3D printers should be branch-based, allow one-to-one experience, and be conducted in small groups.

**Keywords:** 3D Printing, Learning and Applying, Phenomenology.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. 3B yazıcı nedir?

Geçmişten günümüze teknolojinin sürekli olarak değişim ve gelişim gösterdiği bilinmektedir. Teknoloji ilerledikçe insanlar yeni buluşlar ve tasarımlar ortaya koymaktadır. Bunlardan birisi de hayatımızda önemli bir yeri olan üç boyutlu (3B) yazıcılardır. Toplumun değişmesinde 3B yazıcılarının nasıl bir etkisi olacağı tam olarak bilinmemektedir fakat ekonomik, sosyal ve teknik olarak bir devrim yarattığı söylenebilir [1].

Bilgisayarda yer alan üç boyutlu verilerin somut nesnelere dönüştürüldüğü makineler 3B yazıcılar olarak isimlendirilir. Bu yazıcılar geleneksel üretim süreçleriyle üretilmesi zor olan geometrik ürünlerin elde edilmesine imkân tanır [2]. 3B yazıcı teknolojisi, düşük maliyetli, çeşitli özelliklere sahip ve hafif ürünlerin üretimine olanak sağlayan bir teknolojiyi içerir [3]. Bu teknoloji dişli gibi basit ürünleri bir saatten kısa sürede oluşturabilir. Bununla birlikte serbest hareketli parçaları olan nesnelere de üretebilir [4]. 3B baskı, dijital bir modelden gerçek bir nesne oluşturmanın kısa yoludur [1]. 3 boyutlu baskı, yazıcı aracılığıyla bilgisayarda bulunan programlar yardımıyla tasarlanan verileri herhangi bir araç-gereç kullanılmadan makineye ileterek ve katman katman malzemeleri ekleyerek üç boyutlu fiziksel parçaların üretiminin yapılmasıdır [5]. 3B yazıcılar, lazer veya mürekkep püskürtmeli geleneksel yazıcılara benzer biçimde çalışır fakat çok renkli mürekkepler yerine yavaşça yerleşen toz kullanarak ürün elde eder. Bütün 3B yazıcılar ortaya çıkacak üründeki her katmanın nasıl oluşturulacağını belirlemek amacıyla 3B CAD yazılımını kullanırlar. Yazıcı öncelikle sıvı reçine tabakasını ince bir şekilde dağıtır ve bu tabakanın sertleşmesi için lazer kullanır. Son olarak kimyasal banyo ile fazla reçine temizlenir [4].

### 1.2. 3B Yazıcıların Tarihçesi

3B yazıcılarının tarihsel gelişimi şu şekilde özetlenmiştir [6]: İlk olarak 1984 yılında Charles Hull SLA teknolojisini kullanarak 3B yazıcısını geliştirmiştir. 1986 yılında ise Charles Hull bir firma kurarak ilk ticari 3B yazıcısını üretmiştir. Kurulan bu firma tarafından 1988 yılında SLA 250 adındaki ilk model tanıtılmıştır. Yine aynı yılda SLS ve FDM teknolojileri keşfedilmiştir. 1993 yılında

da Massachusetts Institute of Technology (MIT) iki boyutlu yazıcılarda kullanılan püskürtme yönteminden hareketle 3 Dimensional Printing (3DP) teknolojisini bulmuştur. Ayrıca aynı yıl içerisinde ilk renkli baskı yapılmış ve 1995 yılında 3B yazıcılar satışa çıkmaya başlamıştır. 1996 yılında 3B yazıcıların çeşitli modelleri piyasaya sürülmeye ve ilk defa üç boyutlu yazıcı kelimesi kullanılmaya başlanmıştır. 2007 yılında RepRap isiminde açık kaynak kodlu 3 boyutlu yazıcılar çıkmıştır. 2008 yılında kendi parçalarının %50'sini üretebilen RepRap ilk versiyonunu tamamladı. Buna ek olarak Object Geometries firması aynı anda farklı malzemeleri kullanabilen Connex500 adlı modeli geliştirmiştir. 2009 yılında ev tipi 3 boyutlu yazıcıların satışı artmaya başlamıştır. 2011 yılında Southampton Üniversitesi dünyadaki ilk 3D baskılı uçağını tasarlamıştır. 2012 yılında 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak kişiselleştirilmiş z komplikasyona sahip eklem protezi üretilmiştir. 2014 yılında ilk kez uzayda üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. 2015 yılında NASA, 3 boyutlu yazıcı ile uzayda üretim yapmaya başlamıştır. 2016 yılında ise Adidas ve New Balance gibi büyük firmalar 3B yazıcılarla ayakkabı üretimi yapmaya başlamıştır [6].

### 1.3. 3B Yazıcıların Çeşitleri

3B yazıcılar katmanlı üretim yöntemiyle baskılarını katmanlar halinde oluşturmaktadır. Üretim sürecinde birçok farklı teknik mevcuttur. Bu farklı teknikler 3B yazıcıların çeşitlere ayrılmasına neden olmuştur [7].

**Stereolithography (SLA):** Charles Hull'un 3B baskıyı bulduğunda kullandığı bir fotopolimerizasyon yöntemidir [8]. Eritilen materyal lazer ile istenilen şekle getirilerek bir nesne elde edilir. SLA, olağanüstü pürüzsüzlükte baskılar üretir [9].

**Selective Laser Sintering (SLS):** En ekonomik yöntemlerden birisidir. Eritilen özel toz lazer kullanılarak istenilen nesneye dönüştürülür [9]. Bu yöntemin bir yararı, sinterlenmemiş tozun olduğu gibi kalması, basılan yapıya destek sağlaması ve diğer ürünler için yeniden kullanılabilmesidir [8].

**Fused Deposition Modelling (FDM):** Scott Crump, bu yöntemi 1980'lerin sonunda icat etti. Yazıcı, birbiriyle kaynaşan katmanlar halinde bir erimiş termoplastik akışı çıkarır.

Katmanlama, model bitene kadar devam eder. Bu, en ucuz alternatiflerden biridir ve tipik olarak kütüphanelerde kullanılan türdendir [8].

Three Dimensional Printing (3DP): Bu yöntem geleneksel mürekkep yazıcıların çalışma şekline benzerlik göstermekle birlikte aralarındaki tek fark 2 boyutlu yerine 3 boyutlu üretim gerçekleştirmesidir [10].

MakerBot: Açık kaynaklı RepRap sistemlerine dayanan MakerBot 2012 yılında piyasada yer almaya başlamıştır. Açık kaynak kodlu yazılıma sahip ve evde kullanım amacıyla üretilmiştir [11].

#### 1.4. 3B Yazıcıların Günümüzdeki Kullanım Alanları

3B yazıcılar ilk üretildiği zamanlarda çok yüksek maliyette olmasına rağmen özellikle prototip geliştirme sürecinde sanayi alanında sıklıkla kullanılmıştır [12]. İlerleyen zamanlarda ise 3B yazıcıların birçok alanda kullanıldığı görülmektedir. Bunlar; endüstriyel imalat, tekstil, inşaat, mimarlık, mühendislik, otomotiv, havacılık, uzay, tıp, gıda, mücevher, ayakkabı, giyim ve eğitim gibi çok çeşitli alanlardır [1], [3], [13]. Son yıllarda ise genellikle tıp alanında yapay organ üretiminde, canlı hücrelerden yapay doku üretiminde, savunma sanayisinde savaş uçaklarının üretiminde, bazı gıdaların üretiminde kullanılmaktadır [14]. 3B yazıcıların masa üstü türleri günümüzde evlerde de kullanılabilir hale gelmiştir. Yazılım maliyetinin düşmesi yazıcıların insanların daha kolay ulaşabileceği alanlarda kullanımını sağlamıştır. Böylece evlerde ve eğitim ortamlarında kullanılmaya başlanmış ve insanlara teknolojik alanda yeni fırsatlar sunulmuştur [15].

#### 1.5. 3B Yazıcıların Eğitimde Kullanımı

Eğitim sistemimiz öğrencilerden var olan bilgileri kullanarak yeni bilgiler üretmelerini ve bu ürettikleri bilgiler ile günlük hayatta karşılaştıkları problemleri çözmelerini istemektedir. Öğrencilerden yalnızca okur-yazar olmaları değil aynı zamanda verimli ve üretken bireyler olmaları da beklenmektedir [16]. 3B yazıcıların zaman içerisinde hızlı gelişimi ve kolay ulaşılabilir olması eğitim alanında kullanılabilirliğini artırmıştır. 3B yazıcıların erişilebilirlik, uygun fiyat ve öğrenme potansiyeli gibi özelliklerinin olması bu teknoloji hakkında hiçbir bilgisi olmayan

öğrencilerde dahi ilgi uyandırmıştır [17]. Ancak bu ilgiye rağmen 3B yazıcılar eğitim alanında yoğun bir şekilde kullanılmamaktadır. Bunun sebebi olarak öğrencilerin gerekli donanım ve bilgiye sahip olmama ve öğrenme sürecinde kullanımının maliyetli olması gösterilmektedir [18]. 3B yazıcı teknolojileri öğrencilerin problem çözmelerine ve yeni bir ürün ortaya çıkarmalarına katkı sunar. Öğretmenler derslerinde bu teknolojiyi öğrencilerin farklı yeteneklerini keşfetmeye ve çok boyutlu düşünme becerilerini geliştirmeye yönelik kullanmayı tercih edebilirler [19]. Eğitim için stratejik bir önemi olan 3B yazıcılar ilköğretimden üniversiteye kadar özellikle teknik ve mekanik derslerde öğrencilerin çeşitli gelişim alanlarına katkı sağlar. Bu teknoloji öğrencinin hayal gücünü geliştirir ve onlara yeni öğrenme fırsatları sunar [20], [3]. 3B yazıcılar öğrencilerdeki eleştirel düşünme, mantık ve mantık kullanarak problem çözme ve somut nesne üretme becerilerini geliştirmeye yardımcı olur [20], [3]. 3B yazıcı kullanımının öğrencilerin somut öğrenme yaşantılarını ve yaratıcı düşünme becerilerini geliştirirken dersin eğlenceli hale gelmesini sağladığı söylenebilir [12]. 3B yazıcılar ile farklı duyu organlarına hitap eden çeşitli materyaller üretilerek eğitsel açıdan tam ve kalıcı öğrenme sağlanmış olur [13]. 3 boyutlu yazıcılar ile elde edilen nesnelere fen bilimleri dersinde de var olan gözle görülemeyecek kadar büyük veya küçük (güneşin katmanları, dünya, hücre modeli, kromozom yapısı) kavramları somutlaştırmaya imkân sağlar [7]. Özellikle FeTeMM etkinlikleri öğrencilerin çalışmaları ve yeni fikirler üretmeleri açısından motivasyonlarını artırırken 3B yazıcıların kullanılmasıyla da öğrencilerin tasarladıkları modellere dokunabilmeleri onlara farklı deneyimler kazandırır [21].

#### 1.6. Alanyazın İncelemesi

Kuzu Demir vd. [13], 3B yazıcıları tanıtmışlar, eğitim ile ilişkisini açıklayarak Türkiye’de bu teknolojinin nasıl kullanıldığına yer vermişlerdir. Çalışmalarında 3B yazıcıların eğitimde kullanılmasına ilişkin önerilerde bulunmuşlar ve gelecek çalışmalar için kuramsal temel oluşturmayı amaçlamışlardır.

STEM uygulamalarında 3B yazıcıların kullanımına ilişkin fen bilimleri öğretmen adaylarının görüşlerini belirlenmesinin

amaçlandığı çalışmada [20], öğretmen adaylarının 3B yazıcıları materyal olarak destek sağlayan, bilgiyi somutlaştıran, öğrenmeyi kolaylaştıran ve 21. yüzyıl becerilerini içeren bir teknoloji olarak gördükleri belirlenmiştir. Schelly vd. [22], 3B yazıcı teknolojisinin nasıl uygulanabileceğini görmek ve özellikle bilim, teknoloji, matematik ve mühendislik alanlarında eğitim müfredatını iyileştirmek amacıyla bir atölye çalışması gerçekleştirilmiştir. Novak & Wisdom [23], 3B teknolojisinin öğretmen adaylarını aktif, işbirlikçi, probleme dayalı öğrenmeye dahil etmenin bir yolu olarak bir fen bilgisi öğretmeni yetiştirme programında nasıl tanıtılabileceğini ve mevcut bir fen müfredatına nasıl entegre edilebileceğini açıklamışlardır. Öğretmen adayları için ilköğretim fen bilgisi sınıfında gelecekteki öğrencilerine uygulayabilecekleri bir ders modeli tasarlamışlar ve proje sonunda öğretmen adayları, 3B teknolojisinin yüksek kullanılabilirliğini, kullanım kolaylığını, tasarım ve düşünme becerilerini, bilime ve bilimi öğretmeye yönelik tutumlarını geliştirdiğine yönelik düşüncelerini bildirmişlerdir. Holzmann vd. [24], lise öğretmenlerinin 3B teknolojilerini sınıfta kullanmaya yönelik davranışsal niyetlerini araştırmışlardır. Sonuçlar, performans beklentisi, kolaylaştırıcı koşullar, kaygı ve teknoloji kullanımına yönelik tutumun yeni teknolojinin benimsenmesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Beklentilerin aksine, rahatlık beklentisi ve sosyal etki davranışsal niyeti etkilememektedir. Dolayısıyla bu çalışma, bireysel benimseme süreçlerinde yeni bir teknolojiyi kullanmaya yönelik kaygı ve tutumun öneminin daha fazla araştırılması gerektiğinin altını çizerek önceki bilgilere katkıda bulunmaktadır. Ford & Minshall [25], 3B teknolojisinin eğitim alanında nerede ve nasıl kullanılacağına dair literatür taraması yaparak sentezlemiştir. Okullarda, üniversitelerde, kütüphanelerde ve özel eğitim ortamlarında 3B baskı uygulamalarının araştırılmasıyla altı kullanım kategorisi belirlenmiş ve tanımlanmıştır: (1) öğrencilere 3B baskıyı öğretmek, (2) eğitimcilere 3B baskıyı öğretmek, (3) öğretim sırasında bir destek teknolojisi oluşturmak, (4) öğrenmeye yardımcı olan eserler üretmek, (5) yardımcı teknolojiler oluşturmak ve (6) sosyal yardım faaliyetlerini desteklemek. Bu altı kategorinin her birinde 3B baskı tabanlı

öğretim uygulamalarına dair kanıtlar bulunmasına rağmen, uygulama henüz olgunlaşmamış ve gelecekteki araştırma ve eğitim politikası için önerilerde bulunulmuştur. Kökhan & Özcan [3], 3B yazıcıların eğitimde kullanılmasını ve diğer kullanılabileceği alanları irdelemişlerdir. 3B yazıcıların eğitim sürecinde ve eğitim sonrasında birçok avantajlar getireceği öngörülmüş fakat yaygın olmaması nedeniyle eğitimde daha etkili bir şekilde kullanılması için çeşitli yollar aranması gerektiği önerilmiştir. Özsoy & Duman [26], 3B yazıcıların tanıtımı ve eğitimde kullanılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. 3B yazıcıların eğitimde ve diğer alanlarda kullanılmasıyla öğrencilerin daha teknik, donanımlı ve becerili olacaklarını ve ülkenin sanayi strateji hedeflerine ulaşmada pozitif yönde yönlendireceklerini düşündüklerini belirtmişlerdir. Karagöz & Şahin Çakır [19] fen bilgisi öğretmen adaylarının 3B yazıcılar hakkındaki görüşlerini almışlardır. Öğretmen adayları, 3B yazıcıları için okullarda alt yapı ve teknolojik yetersizliğin olması, 3B yazıcıları kullanacak eğitimcilerin az olması ve bu teknolojilerin maliyetli olması şeklinde görüş bildirdikleri tespit edilmiştir. 3B yazıcıların eğitim alanında kullanılmasına yönelik öğretmenlere aktif katılımı eğitimler verilmesi yönünde önerilerde bulunmuşlardır. Yıldırım [27], çalışmalarında 3B yazıcıların eğitimde kullanımına yönelik öğretmenlerin görüşleri alınmıştır. Çalışma sonucunda öğretmenlerin, 3B yazıcı teknolojisini beğendiği ve etkilendiği görülmüştür. Eğitimde özellikle Fen ve Matematik bilim dallarında 3B yazıcıların önemli bir yeri olduğu ve öğretim amaçlı kullanıldığından son derece faydası olacağı belirtilmiştir. Yıldırım [28], ortaokul öğrencilerinin 3B programlar ve 3B yazıcılar hakkındaki deneyimleri ve görüşlerini belirlemeyi hedeflemiştir. Öğrenciler tarafından 3B yazıcıların beğenildiği tespit edilmiştir. 3B yazıcıların kolay çizim yapma, hızlı prototip geliştirme, anlamayı kolaylaştırma ve etkili öğrenme ortamları oluşturmada önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Arslan & Erdoğan [29], gerçekleştirdikleri çalışmada 3B yazıcı etkinliklerinin öğretmen adaylarının teknolojik pedagojik alan bilgisi öz-yeterlilikleri ve bu etkinliklere yönelik görüşleri üzerindeki etkileri belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırma sonucunda 3B yazıcı etkinliklerinin öğretmen adaylarının Teknolojik Pedagojik Alan Bilgisi



(TPAB) öz yeterliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Öğretmen adaylarının 3B yazıcıların beceri geliştirmeye yardımcı olduğunu ve öğrenme, öğretme sürecine katkı sağladığını düşündükleri belirlenmiştir. Bununla birlikte öğretmen adayları 3B nesnelere; öğrenmeyi kolaylaştırmada, soyut kavramları somutlaştırmada, öğrenmenin kalıcı olmasını sağlamada, dersleri eğlenceli hale getirmede, yaratıcı düşünme, özgün materyal oluşturma ve tasarım becerilerini geliştirmede faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada Doğru ve Özsevegç [38], 3 boyutlu materyallerin kullanımının fen eğitiminde hücre bölünmeleri üzerinde etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonuçları 3 boyutlu materyallerin öğrenme üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Akyol vd. [14], öğretmen ve üstün yetenekli öğrencilerin 3B yazıcı kullanımının eğitsel katkılarına yönelik görüşlerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Sonuçta 3B teknolojilerinin öğrencilerin bilgi ve becerilerini geliştirdiği, proje tasarlarken ve üretirken bu teknolojileri kullandıkları ve bu teknolojilerin proje üretmede öğrencileri motive ettiği belirlenmiştir. Bir başka çalışmada Aslan vd. [34] çalışmalarında 103 fizik, kimya ve biyoloji öğretmenin 3B kullanım deneyimleri üzerinde bir araştırma yürütmüşlerdir. Araştırma sonuçları katılımcıların 3B model tasarlamak istediklerini ancak daha önce 3B model tasarlayarak bu modeli derslerinde kullanmadıklarını göstermektedir. Ek olarak araştırmacılar katılımcıların %97'sinin 3B model tasarlama deneyiminin olmadığı belirlenmiştir. Gülerüz [36], öğretmen adayları ile Robotik kodlama ve 3B yazıcı uygulamalarında STEM temelli inovatif düşünme becerileri ve dijital teknolojiye yönelik tutumlarını incelemiştir. Öğretmen adaylarının yapılan etkinliklerde olumlu tutum sergilediği sonucuna ulaşmıştır.

Aslan ve Çelik ise [39] 3 boyutlu baskı teknolojilerinin eğitim alanlarında uygulanmasına yönelik yerli ve yabancı çalışmaları taramıştır. Çalışma sonuçları eğitim ile 3B baskı teknolojisinin her yaş ve alana uyarlanabilir olduğunu ve disiplinler arası çalışmalarda büyük kolaylık sağladığını göstermektedir.

Aslan [40], öğretmen adaylarının erken çocukluk eğitiminde 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımına ilişkin görüşlerini incelemiş ve katılımcıların ilgili teknolojiye

ilişkin yüzeysel bilgiye sahip olduğunu işaret etmektedir.

### 1.7. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Mevcut araştırma ile öğretmenlerin 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimlerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Öğretmenlerin 3B yazıcılar hakkındaki öğrenme deneyimlerinden çıkan sonuçların ileride yapılacak eğitimleri planlama açısından rehberlik edeceği düşünülmektedir. Ayrıca öğretmen görüşleri doğrultusunda 3B yazıcı uygulama deneyimlerinden çıkan sonuçların ise öğretmenlere 3B yazıcı kullanımı noktasında ne gibi zorluklarla karşılaştıkları, derste nasıl kullandıkları ve eğitime entegrasyonu noktasında yol göstereceği düşünülmektedir. Bununla birlikte bu çalışma 3B yazıcı eğitimi almış öğretmen ile yürütülmesi noktasında önceki araştırmalardan farklılık göstermektedir. Ek olarak bu çalışmanın katılımcıları daha önce 3B yazıcı eğitimi almış ve bir materyal tasarlanması sürecinde aktif rol almıştır.

Bu doğrultuda araştırma sorusu “öğretmenlerin 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimlerine ilişkin görüşleri nasıldır?” şeklinde belirlenmiştir.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Araştırma Deseni

Araştırmada, nitel araştırma desenlerinden olgubilim tercih edilmiştir. Patton'a [30] göre olgu bilim deseni, bireylerin tecrübelerine ilişkin durumu nasıl betimledikleri ve deneyimledikleri ile ilgilidir. Mevcut araştırmada ise öğretmenlerin 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimleri incelenmeye çalışıldığı için olgu bilim deseni ile yürütülmüştür. Bu araştırmaya ait olguda ele alınan durum ise 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimidir.

### 2.2. Katılımcılar

Araştırma, İç Anadolu bölgesinin bir ilinde bulunan 3B yazıcı eğitimi almış altı öğretmen ile yürütülmüştür. Nitel araştırmalarda örneklem sayısının belirlenmesinde göz önüne alınması gereken kriterlerden biri araştırmanın odağıdır. Araştırmanın odağına göre bir veya birkaç durumun incelenmesi ya da farklı özellikleri taşıyan grubun tek başına incelenmesi gerekebilmektedir [33]. Bu araştırmada 3B yazıcı eğitimi almış olan

öğretmenlerin deneyimlerine odaklanılmıştır. Bu sebeple cinsiyet, mesleki kıdem, görev bölgesi, branş ve öğrenim durumu gibi kriterlere göre farklı özelliklere sahip katılımcılara ulaşılmaya çalışılmış ve 3B yazıcı eğitimi almış bir grup olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Katılımcıların belirlenmesinde amaçlı örnekleme yöntemlerinden birisi olan ölçüt örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Ölçüt örnekleme, daha önceden belirlenmiş belirli kriterleri karşılayan durumların çalışması

olarak ifade edilmektedir [31]. Mevcut araştırmada ise katılımcı öğretmenlerin belirlenmesindeki ölçüt, öğretmenlerin 3B yazıcı eğitimi almış olmalarıdır. Katılımcı öğretmenlerin gizliliğinin sağlanması adına kadın öğretmenler K1, K2 ve K3; erkek öğretmenler ise E1, E2 ve E3 şeklinde kodlanmıştır. Katılımcıların demografik bilgileri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1. Katılımcılara ilişkin demografik bilgiler**

Öğretmen	Cinsiyet	Mesleki Kıdem	Görev Bölgesi	Branş	Öğrenim Durumu	3B Yazıcılara İlişkin Aldığı Eğitimler
E1	Erkek	9	Merkez	Teknoloji ve Tasarım	Lisans	3B yazıcı ile tasarım ve üretim kursu
K1	Kadın	12	İlçe	Fen bilimleri	Doktora	3B yazıcı ile tasarım kursu
K2	Kadın	11	Merkez	Fen bilimleri	Y. Lisans	3B yazıcı tanıtımı eğitimi
E2	Erkek	8	Merkez	Bilişim teknolojileri	Lisans	3 boyutlu tasarım ve baskı eğitimi (Online)
E3	Erkek	6	İlçe	İlköğretim	Lisans	Tasarım ve beceri atölye eğitmenliği kursu
K3	Kadın	5	Köy	Fen bilimleri	Y. Lisans	Online eğitim

Çizelge 1 incelendiğinde katılımcıların üç kadın ve üç erkek öğretmenlerden oluştuğu görülmektedir. Bu öğretmenlerden üç tanesi il merkezinde, iki tanesi ilçe merkezinde ve bir tanesi köyde görev yapmaktadır. Ayrıca, öğretmenlerin mesleki kıdemlerinin beş ve 12 yıl arasında değiştiği görülmektedir. Katılımcıların 3B yazıcılara ilişkin temel düzeydeki eğitimleri aldıkları da görülmektedir.

### 2.3. Veri Toplama Aracı

Araştırmada veri toplama aracı olarak görüşme formu kullanılmıştır. Araştırmacılar literatür taraması yapılmış [20-35] ve yarı yapılandırılmış görüşme soruları araştırmacılar tarafından hazırlanmıştır. Taslak görüşme soruları bir alan uzmanı tarafından incelenmiş ve görüşme sorularına son şekli verilmiştir. Uzman görüşü sonrasında soru sayısında değişiklik olmamıştır. Görüşmeler online olarak Google form aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Nihai yarı yapılandırılmış görüşme formu iki ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde katılımcılara ilişkin demografik bilgiler bulunurken (altı soru) ikinci bölümde katılımcıların 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimlerine ilişkin sorular (altı soru) bulunmaktadır.

### 2.4. Geçerlik ve Güvenirlik

Araştırmada geçerlik ve güvenilirlik sağlanması adına önlemler alınmıştır. Araştırmada iç geçerlilik sağlanması adına veri toplama, analiz ve sonuçların yazımında uzman incelenmesine sunulmuştur. Dış geçerlilik sağlanmasında amaçlı örnekleme yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca araştırmanın güvenilirliğinin sağlanmasında güvenilirlik katsayısı hesaplanmıştır. Araştırmacılar arası güvenilirlik hesaplanmış ve Miles & Huberman [32] Görüş Birliği/(Görüş Birliği + Görüş Ayrılığı) formülü ile güvenilirlik değeri %86 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın geçerlilik ve güvenilirliğini artırmak amacıyla katılımcı görüşlerinden direkt alıntı yapılmış ve katılımcılar K1 (Katılımcı 1), K2,... şeklinde ifade edilmiştir.

### 2.5. Verilerin Analizi

Araştırmada veriler içerik analizi ile çözümlenmiştir. İçerik analizi, birbirine benzer verileri belli kavram ve tema çerçevesinde birleştirerek verilerin anlaşılır olarak düzenlenip yorumlanmasını sağlamaktadır [30]. Katılımcı görüşleri metin dosyası haline getirilerek kodlar oluşturulmuştur. Bu kodlar belirli kategoriler altında sıralanmıştır. Kategoriler ise “3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimleri” isimli araştırmanın teması çatısında toplanmıştır. Kod, kategori ve temaların belirlenmesi süreci iki farklı

araştırmacı tarafından yapılmıştır. Ayrıca kod, kategori ve temaların belirlenmesi sürecinde uzman görüşleri de alınmıştır. Ardından bu veriler tablolar halinde gösterilmiş ve tablo altında katılımcılara ilişkin doğrudan alıntılara yer verilmiştir.

### 3. BULGULAR

Bu çalışma kapsamında 3B yazıcılar ile ilgili eğitim almış öğretmenlerin 3B yazıcılara ilişkin görüşleri incelenmiştir. Bu kapsamda 6 katılımcı ile yarı yapılandırılmış görüşmeler yapılmıştır. Elde edilen bulgular alt başlıklar halinde sıralanmıştır.

#### 3.1. 3B Eğitimi Alma Sebepleri

Katılımcıların 3B yazıcı eğitimi alma sebeplerine ilişkin veriler Çizelge 2'de yer almaktadır.

**Çizelge 2** Katılımcıların 3B eğitimi alma sebepleri

Tema	Kategori	Katılımcı
Kişisel sebepler	Kişisel ilgi	K1, K2, K3
	Bilgi sahibi olmak	E2
	Kişisel gelişim	E1, E3
Eğitsel sebepler	Derslerimde etkili kullanmak	K1, E2, E3
	Faydalı olmak	E1
	Çağın gereklerine uymak	E1
	Teknolojiye ayak uydurmak	E3

Çizelge 2 incelendiğinde katılımcıların eğitim almalarının temel sebebinin kişisel ilgi (f=3) ve 3B yazıcıları derslerinde etkili kullanma olduğu (f=3) görülmüştür. Bununla birlikte iki katılımcı kişisel gelişimlerine katkı sağlamak amacıyla 3B yazıcı eğitimi aldıklarını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte katılımcılar teknolojiye ve çağın gereklerine uyum sağlamak, öğrencilere faydalı olmak ve konu ile ilgili ayrıntılı bilgi almak amacıyla eğitim aldıklarını belirtmişlerdir. Aşağıda örnek bir katılımcı görüşü yer almaktadır.

E2: "3B hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak ve derslerimde etkili kullanmak için."

#### 3.2. 3B Yazıcı Eğitimlerine İlişkin Görüşler

Katılımcıların aldıkları eğitimlere ilişkin görüşleri Çizelge 3'te yer almaktadır.

**Çizelge 3.** Katılımcıların 3B yazıcı eğitimlerine ilişkin görüşleri

Tema	Kategori	Katılımcı
Pozitif	Temel eğitim alma	K1, K2, E2, E3
	Faydalı	E2, E3, K3
	İstenilen kalite	E3, K3
	Derslerde kullanabilme	E3
	Ayrıntılı bilgi sabini olma	E2
	Baskı tekniklerini öğrenme	E2
	Ham madde kullanımı	K1
	Teorik-pratik uyumu	E3
	Örnek projelerin gösterilmesi	K3
	İyi düzenlenmiş olması	K3
Negatif	Deneyim yetersizliği	E2, K3
	Basit bir tanıtım eğitimi	K2
	Detaya yer verilmemişti	K2
	Plansızlık	E1
	Denetlenebilirdi	K2
	Meslek lisesine yönelik	K1
	Gösteri tarzında olması	K1
	Yüzeyseldi	K1
Verim alamadım	K1	

Çizelge 3 incelendiğinde katılımcıların aldıkları eğitime ilişkin görüşlerinin iki tema altında toplandığı görülecektir. Bu temalar "Olumlu eleştiri" ve "Olumsuz eleştiri" şeklindedir. Olumlu eleştiri teması altında 10 ifade yer almaktadır. Katılımcılar temel eğitimi aldıklarını (f=4), eğitimi faydalı bulduklarını (f=3), eğitimin kaliteli olduğunu (f=2) ve çok sayıda proje örneği gördükleri için eğitimlerin etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Çizelge 3 incelendiğinde olumsuz eleştiride bulunduğu görülmektedir. Katılımcılar eğitimlerin birebir deneyim yaşamalarına izin vermemesi (f=2), eğitimin basit olması, yeterince detaylandırılmamış olması, iyi planlanmamış ve denetlenmemiş olmaması sebebiyle eleştirmişlerdir. Aşağıda bu duruma örnek bir katılımcı görüşü yer almaktadır.

K3: "Almış olduğum eğitimler gayet verimliydi. Eğitim sırasında kullanılan programın bilgisayara yüklenmesi sürecinden itibaren anlatılmaya başlandı. Eğitimde öğretilenleri direkt kendi bilgisayarımızda uygulayabildik ve bu şekilde verimli bir eğitim oldu."

#### 3.3. 3B Yazıcı Eğitimlerin Olası Katkıları

Katılımcıların 3B yazıcı eğitimi sonrasında elde ettikleri kazanımlara ilişkin veriler Çizelge 4'te yer almaktadır.

**Çizelge 4.** 3B yazıcı eğitimlerin katılımcılara olası katkıları

Tema	Kategori	Katılımcı
Katkı	Derse entegre edilebilme	E2, E3
	Parça üretimini öğrenme	K1
	3B yazıcıları tanıma	K2
	Çalışma prensibini tanıma	E1
	3B yazıcı ile robotik kodlamanın birleştirilmesi	K3

Çizelge 4 incelendiğinde katılımcılar elde ettikleri kazanımların başında öğrendikleri yeni bilgileri derse entegre edebileceklerini ( $f=2$ ), üretim sürecini anlamlandırdıklarını, 3B yazıcıları daha iyi tanıdıklarını, 3B yazıcıların çalışma prensiplerini anladıklarını ve 3B yazıcı eğitimini robotik kodlama ile ilişkilendirebildiklerini ifade etmişlerdir. Aşağıda örnek bir katılımcı görüşü yer almaktadır.

*K2: "Evet katkı sağladı. Eğitim sayesinde okulumda veya başka bir yerde görmediğim 3B yazıcı ile tanışma fırsatı buldum."*

### 3.4. 3B Yazıcı Eğitimini Etkili Kullanımı

Katılımcıların aldıkları 3B yazıcı eğitimini okul ve sınıflarına yansıtma düzeylerine ilişkin görüşleri Çizelge 5'te yer almaktadır.

**Çizelge 5.** 3B yazıcı eğitimini etkili kullanımına ilişkin katılımcı görüşleri

Tema	Kategori	Katılımcı
3B Yazıcıların etkili kullanımı	Baskı alma	E1
	Öğrencilere aktarma	E2
	Matematik materyalleri tasarlama	E3
	Robotik kodlama ile ilişkilendirme	K3
Kullanamama	Teknik imkansızlıklar	K1, K2, E3

Çizelge 5 incelendiğinde katılımcıların aldıkları eğitimlerin 3B baskı alma noktasında, öğrencilere bilgi aktarmada, materyal tasarlamada ve robotik kodlama ile ilişkilendirme etkili olabileceğini, ancak okullarında teknik alt yapının yetersiz olmaması sebebiyle bu tür uygulamalar yapmakta zorluk çektiklerini ifade etmişlerdir. Aşağıda örnek bir katılımcı görüşü yer almaktadır.

*E1: "Düşünüyorum. 8. Sınıf konularımız içerisinde 3B yazıcılar çalışma prensipleri baskı nasıl alınır uygulamalı olarak anlatılmaktadır. Öğrenciler Bilgisayar Destekli Tasarım konusunda yapmış oldukları*

*tasarlarını 3B yazıcılar ile baskılar almaktayız."*

### 3.5. 3B Yazıcı Eğitime İlişkin Öneriler

Katılımcıların 3B yazıcı eğitime ilişkin önerileri Çizelge 6'da yer almaktadır.

**Çizelge 6.** Katılımcıların 3B yazıcı eğitime ilişkin önerileri

Tema	Kategori	Katılımcı
Eğitimlere ilişkin öneriler	Yüz yüze eğitim	E2, K3
	Planlı hizmet içi eğitim	E1
	Denetim	E1
	Birebir deneyim	K1
	Eğitim sayısının artması	K2
	Eğitim süresinin uzatılması	E3
	Branş bazlı eğitim	E3
	Küçük gruplarla yürütülebilir	E1

Çizelge 6 incelendiğinde katılımcıların 3B yazıcılarla ilişkin sekiz öneride bulunduğu görülmektedir. Katılımcılar eğitimlerin yüz yüze yapılması gerektiğini ( $f=2$ ), bu eğitimlerin planlı, düzenli, denetimli, branş bazlı, birebir deneyime izin veren ve küçük gruplarla yürütülmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte katılımcılar eğitim süresinin daha uzun olması ve eğitim sayısının artırılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Aşağıda örnek bir katılımcı görüşü yer almaktadır.

*E3: "Bu eğitimler daha uzun sürebilir. Bu eğitimlere katılımcı seçilirken branş bazlı eğitimlerde verilebilirdi. Yani matematik branşım olduğu için bütün matematik öğrenmeleri ile bu kursu almak daha etkili olabilirdi. Hem zümreler arası 3B yazıcıların derste kullanımına ilişkin beyin fırtınası yapabildik ve tartışma ortamı olabilirdi"*

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Katılımcıların kişisel ilgi, derslerinde 3B yazıcı teknolojisini etkili kullanma, kişisel gelişimlerine katkı, teknolojiye ve çağın gereklerine uyum sağlamak, öğrencilere faydalı olmak ve konu ile ilgili ayrıntılı bilgi almak gibi farklı gerekçelerle 3B yazıcı teknolojisine ilişkin eğitim aldıkları görülmüştür. Ayrıca katılımcılardan olumlu görüş belirtenlerin; temel eğitimi aldıkları, eğitimi faydalı bulduklarını, eğitimin kaliteli olduğunu, teorik ve uygulamalı etkinlikler bulunduğunu ve çok sayıda proje örneği

gördükleri için eğitimlerin etkili olduğunu belirttikleri görülmüştür. Olumsuz görüş belirtenlerin ise eğitimlerde birebir deneyim yaşayamamaları, eğitimin basit olması, yeterince detaylandırılmamış olması, iyi planlanmamış ve denetlenmemiş olmaması sebebiyle eleştirdikleri görülmüştür. Benzer şekilde Gülyüz vd. [20], STEM uygulamalarında 3B yazıcıların kullanımı ile ilgili öğretmen adaylarının görüşlerine başvurmuş ve 3B yazıcıların bilgiyi somutlaştırdığı, öğrenmeyi kolaylaştırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Katılımcıların elde ettikleri kazanımların başında öğrendikleri yeni bilgileri derse entegre edebileceklerini, üretim sürecini anlamlandırdıklarını, 3B yazıcıları daha iyi tanıdıklarını, 3B yazıcıların çalışma prensiplerini anladıklarını ve 3B yazıcı eğitimini robotik kodlama ile ilişkilendirebildiklerini sonuçlarına ulaşılmıştır. Alan yazında Gülyüz [36], öğretmen adaylarına STEM temelli etkinliklerde bilişimsel üretim becerileri kazandırmada robotik-kodlama ve 3B tasarım etkinliklerinin yürütülmesinin ve öğretmen adaylarıyla disiplinler arası uygulamalar yürütülmesinin önemli olduğunu ifade etmektedir.

Bununla birlikte katılımcıların aldıkları eğitimlerin 3B baskı alma noktasında, öğrencilere bilgi aktarmada, materyal tasarlamada ve robotik kodlama ile ilişkilendirme noktasında etkili olabileceğini, ancak okullarında teknik alt yapının yetersiz olması sebebiyle bu tür uygulamalar yapmakta zorluk çektiklerini ifade etmektedirler. Novak & Wisdom [23], öğretmen adaylarının 3B teknolojisinin yüksek kullanılabilirliğini, kullanım kolaylığını, tasarım ve düşünme becerilerini, bilime ve bilimi öğretmeye yönelik tutumlarını geliştirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Karagöz & Şahin Çakır [19], 3B yazıcılara yönelik okullarda alt yapı problemlerinin verimliliği etkileyebileceği yönünde dezavantajların bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Katılımcılar eğitimlerin yüz yüze yapılması gerektiğini, bu eğitimlerin planlı, düzenli, denetimli, branş bazlı, birebir deneyime izin veren ve küçük gruplarla yürütülmesi gerektiğini şeklinde önerilerde bulunmuşlardır. Bununla birlikte katılımcılar eğitim süresinin

daha uzun olması ve eğitim sayısının artırılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Karagöz & Şahin Çakır [19], öğretmen adaylarının 3B yazıcıların kullanılmasına yönelik öğretmenlerin bu konuda bilgi sahibi olması gerektiğini ve uygulamalar yapılması yönünde önerilere yer verilmiştir.

## 5. ÖNERİLER

1. Bu çalışma ile 3B yazıcı eğitimi almış öğretmenlerin görüşleri incelenmiştir. İleriki çalışmalarda 3B yazıcılara ilişkin öğrenci deneyimleri de incelenebilir.

2. Bu çalışmada nitel araştırma deseni tercih edilmiştir. İleriki çalışmalarda karma araştırma deseni de tercih edilerek nitel ve nicel veriler toplanabilir.

3. Bu çalışmada sadece görüşme formu kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda veri toplama aracı olarak gözlemler de tercih edilebilir.

4. Araştırma sonucunda öğretmenlerin mesleki anlamda kendilerini geliştirmek istedikleri bu nedenle de 3B yazıcı eğitimi almak istedikleri, eğitim alan öğretmenlerin derslere entegre ettikleri ve kullandıkları görülmüştür. İleriki yıllarda öğretmen eğitiminde lisans ve lisansüstü seviyelerde seçmeli ders olarak eklenebilir.

5. Öğretmenlerin 3B yazıcı ve robotik kodlamayı birlikte kullanmak istedikleri ancak okullardaki teknik malzeme eksikliğinden dolayı gerçekleştiremedikleri sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple okullarda 3B yazıcılar ve robotik kodlama araçlarındaki eksikliklerin giderilmesi ve malzeme sayılarının düzenli kontrol edilerek bakımlarının yapılması önerilir.

6. Doğru (2023) [37], yapay zekanın eğitimde kullanımına dikkat çekmiştir. Bu konuda 3B yazıcılarda basılacak materyallerin tasarımının yapay zeka desteği ile oluşturulması önerilmektedir.

## ETİK KURUL İZİN BİLGİSİ

Bu araştırma, Erciyes Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler 2023/290 tarih ve başvuru nolu izni ile yürütülmüştür.

**KAYNAKÇA**

1. Olla, P. "Opening pandora's 3D printed box." IEEE Technology and Society Magazine, Vol. 34, Issue 3, Pages 74-80.
2. Çelebi, N., ve Taşçı, T., "Sanayi 4.0 ve bulut bilişim", K. Çetinkaya, P. Demircioğlu, K. Özsoy & B. Duman (Eds.), Sanayi 4.0 teknolojik alanları ve uygulamaları, Sayfa 253-260, Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara, 2019.
3. Kökhan, S. ve Özcan, U., "3D yazıcıların eğitimde kullanımı", Bilim, Eğitim, Sanat ve Teknoloji Dergisi (BEST Dergi), Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 81-85, 2018.
4. Berman, B., "3-D printing: The new industrial revolution", Business horizons, Vol. 55, Issue 2, Pages 155-162, 2012.
5. Yılmaz, F., Arar, M. E. ve Koç, E., "3D baskı ile hızlı prototip ve son ürün üretimi", Metalurji Dergisi, Cilt 168, Sayfa 35-40, 2013.
6. Akbaba, A. İ., "Endüstri 4.0 ve 3 boyutlu yazıcılar. İmaj Yayınevi, Ankara, 2019.
7. Halaç, H., ve Bozdoğan, A. E., "3 boyutlu yazıcıların fen eğitiminde kullanılması" 5. Uluslararası İnsan, Toplum ve Spor Bilimleri Sempozyumu", Sayfa 71-77, Antalya, 2019.
8. Prince, J. D., "3D printing: an industrial revolution", Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, Vol. 11, Issue 1, Pages 39-45, 2014.
9. Deutsch, S., "Industrial materials and methods", A. K. France, Make: 3D printing, Pages 97-99, Maker Media, 2014.
10. Balcıoğlu, Y. S., "3 boyutlu yazıcı ve sinemada kullanımı", Yüksek Lisans tezi, Yaşar Üniversitesi, İzmir, 2014.
11. Hausman, K. K. & Horne, R., "3D printing for dummies", John Wiley & Sons, 2014.
12. Eisenberg, M., "3D printing for children: What to build next?", International Journal of Child-Computer Interaction, Vol. 1, Issue 1, Pages 7-13, 2013.
13. Kuzu Demir, E. B., Çaka, C., Tuğtekin, U., Demir, K., İslamoğlu, H. ve Kuzu, A., "Üç boyutlu yazdırma teknolojilerinin eğitim alanında kullanımı: Türkiye'deki uygulamalar", Ege Eğitim Dergisi, Cilt 17, Sayı 2, Sayfa 481-503, 2016.
14. Akyol, C., Uygur, M., and Yanpar Yelken, T., "3D printers as an educational tool in gifted education: effective use, problems and suggestions", Journal for the Education of Gifted Young Scientists, Vol. 10, Issue 2, Pages 173-205. 2022.
15. Gürel, T. A., "Fen eğitiminde 3d yazıcıların kullanımının öğrencilerin tutumlarına ve görüşlerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2019.
16. Yüksel, A. O., "Okul öncesi dönemde üç boyutlu tasarım ve üretimin çocukların bilişme yönelik algılarına etkisi", Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2015.
17. Dickson, B., Weber, J., Kotsopoulos, D., Boyd, T., Jiwani, S., and Roach, B., "The role of productive failure in 3D printing in a middle school setting", International Journal of Technology and Design Education, Vol. 31, Pages 489-502, 2021.
18. Sönmez, S., Kesen, U., ve Dalgıç, C., "3 boyutlu yazıcılar". 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, Sayfa 471-481, İstanbul, 2018.
19. Karagöz, B., ve Şahin Çakır, Ç., "Fen bilgisi öğretmen adaylarının 3 boyutlu yazıcılar hakkındaki görüşlerinin belirlenmesi", Karaelmas Eğitim Bilimleri Dergisi, Cilt 8, Sayı 2, 303-317, 2020.
20. Güleriyüz, H., Dilber, R., ve Erdoğan, İ., "STEM uygulamalarında öğretmen adaylarının 3D yazıcı kullanımı hakkındaki görüşleri", Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 1-8, 2019.
21. Brown, A., "3D printing in instructional settings: Identifying a curricular hierarchy of activities", TechTrends, Vol. 59, Issue 5, Pages 16-24, 2015.
22. Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., and Pearce, J. M., "Open-source 3-D printing technologies for education: bringing additive manufacturing to the classroom", Journal of Visual Languages & Computing, Cilt 28, Sayfa 226-237. 2015.
23. Novak, E., and Wisdom, S., "Using 3D printing in science for elementary teachers", Active learning in college science: The case for evidence-based practice, Pages 729-739, 2020.
24. Holzmann, P., Schwarz, E. J., and Audretsch, D. B., "Understanding the determinants of novel technology adoption among teachers: the case of

3D printing”, The Journal of Technology Transfer, Vol. 45, Pages 259-275, 2020.

25. Ford, S., and Minshall, T. H. W. “Where and how 3D printing is used in teaching and Education”, Additive Manufacturing, Vol. 25, Pages 131-150, 2019.

26. Özsoy, K., ve Duman, B., “Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 1, Sayı 1, Sayfa 36-48, 2017.

27. Yıldırım G., “Teachers' opinions on instructional use of 3D printers: A case study”, International Online Journal of Educational Sciences, Vol. 10, Issue 4, Pages 304-320, 2018a.

28. Yıldırım G., “Opinions of secondary school students on 3d modelling programs and 3D printers according to using experiences”, Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET, Vol. 17, Issue 4, Pages 19-31, 2018b.

29. Arslan, A., ve Erdoğan, I. “Use of 3D printers for teacher training and sample activities”, International Journal of Progressive Education, Vol. 17, Issue 3, Pages 343-360, 2021.

30. Patton, M.Q., “Nitel araştırma ve değerlendirme yöntemleri”, Pegem Akademi, Ankara, 2014.

31. Yıldırım, A., ve Şimşek, H., “Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri. (9.Baskı)”, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2013.

32. Miles, M. B., and Huberman, A. M., “Qualitative data analysis: An expanded sourcebook qualitative data analysis (2nd Ed.)”, Sage Publications, London, 1994.

33. Yıldırım, A., ve Şimşek, H., “Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri. (10. Baskı)”, Ankara:SeçkinYayıncılık, 2016.

34. Aslan A., Durukan Ü.G., Batman D., “Fizik, Kimya ve Biyoloji Öğretmenlerinin 3-Boyutlu Katı Model Tasarım ve Kullanım İhtiyaçlarına Genel Bir Bakış” Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., Vol. 5, Issue 3, Pages 515-534, 2021.

35. Yıldırım, K., & Keşan, C., “Matematik Öğrenme Sürecinde Üç Boyutlu Yazıcı Kullanımına İlişkin Öğrenci Görüşlerinin İncelenmesi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Dergisi, Sayı 53, Sayfa 558-586, 2022.

36. Güteryüz, H., “STEM based innovative thinking skills and attitudes towards digital technology in robotic coding and 3D printer applications.” OPUS Journal of Society Research, Vol. 20, Issue Human Behavior and Social Institutions, 812-824, 2023.

37. Doğru, S., ChatGPT-Science Education and Instruction Reshapes Management. Online Science Education Journal, Cilt 8, Sayı 1, Sayfa 12-21, 2023.

38. Doğru, M. S., Özsevgeç, L. C. “Comparison of Effects of Computer-Based Instructional Support on Academic Achievement of University Students Regarding Meiosis.” The American Biology Teacher, Vol. 85, Issue 5, Pages 259-264

39. Aslan A., Çelik Y. “A Literature Review on 3D Printing Technologies In Education.” International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Vol. 6, Issue 3, Pages 592-613.

40. Aslan A., “Integrating 3d Printing In Pre-School Education: Perceptions From Pre-School Teachers And Prospective Teachers.” International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Vol.7, Issue 3, Pages 428-440.

## EK1. GÖRÜŞME FORMU

Merhabalar,

**Öğretmenlerin 3B yazıcı öğrenme ve uygulama deneyimlerine ilişkin görüşleri yönelik bir araştırma yapılmaktadır.** Bu araştırmada elde edilen veriler sadece bu araştırmada kullanılacak ve kişisel bilgiler tamamen gizli tutulacaktır. Bu araştırmaya katılmayı kabul ettiğiniz için teşekkür ederim.

### Demografik Sorular

1. Cinsiyetiniz: Kadın ( ) Erkek ( )
2. Meslekte kaçınıcı yılınızı çalışıyorsunuz?
3. Görev yaptığınız okulun bağlı olduğu yer: Merkez ( ) İlçe ( ) Köy ( )
4. Branşınız:.....
5. Öğrenim durumunuz: Ön Lisans ( ) Lisans ( ) Y. Lisans ( ) Doktora ( )
6. 3B yazıcı ile ne tür eğitimler aldınız? :.....

### Görüşme Soruları

1. 3B yazıcı ile ilgili eğitime (lere) katılma sebebiniz nedir? Açıklar mısınız?
2. Aldığınız eğitimlerde yürütülen 3B yazıcılarla etkinliklerine yönelik görüşleriniz nelerdir? Açıklar mısınız?  
**Sonda:**
  - a. Size göre bu eğitimlerde olumlu gördüğünüz yönler nelerdir?
  - b. Size göre bu eğitimlerde olumsuz gördüğünüz yönler nelerdir?
  - c. Bu eğitimlere yönelik önerileriniz neler olabilir?
3. 3B yazıcı ile ilgili verilen eğitim (lere) sürecine yönelik görüşleriniz nelerdir? Açıklar mısınız?
4. 3B yazıcı eğitiminin size katkı sağladığını düşünüyor musunuz? Evet ise bu katkıları açıklar mısınız?
5. 3B yazıcı eğitiminde herhangi bir zorlukla karşılaştınız mı? Karşılaştıysanız lütfen açıklar mısınız?
6. Öğretmenlik mesleğinizde 3D yazıcıları öğretimde etkili olarak kullandığınızı düşünüyor musunuz? Neden?





ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF 3D-PRINTED POROUS POLYLACTIC ACID/HYDROXYAPATITE SCAFFOLDS

**Yazarlar (Authors):** Nurcan Acar<sup>ID</sup>, M. Kürşat Terzi<sup>ID</sup>, Adem Yılmaz<sup>ID</sup>, Rümeysa Aydoğdu<sup>ID</sup>, Büşra Mutlu<sup>ID</sup>, Şeyma Duman<sup>ID\*</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Acar N., Terzi M. K., Yılmaz A., Aydoğdu R., Mutlu B., Duman Ş., "Design and Structural Analysis of 3D-Printed Porous Polylactic Acid/Hydroxyapatite Scaffolds" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 71-79, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1347163

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF 3D-PRINTED POROUS POLYLACTIC ACID/HYDROXYAPATITE SCAFFOLDS

Nurcan Acar<sup>a</sup>, M. Kürşat Terzi<sup>a</sup>, Adem Yılmaz<sup>a</sup>, Rümeysa Aydoğdu<sup>a</sup>, Büşra Mutlu<sup>a,b</sup>, Şeyma Duman<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, TURKEY.

<sup>b</sup>Bursa Technical University, Central Research Laboratory, Türkiye.

\* Corresponding Author: [seyma.duman@btu.edu.tr](mailto:seyma.duman@btu.edu.tr)

(Received: 23.08.23; Revised: 15.03.24; Accepted: 18.03.24)

## ABSTRACT

Different designs of three-dimensional (3D) structures have gained increasingly significant in bone tissue engineering. For scaffolds, having appropriate porosity and adequate mechanical properties is crucial. The porosity and mechanical properties of scaffolds are highly influenced by their 3D modeled design. By evaluating the mechanical properties of scaffolds with various designs, it can be confirmed that they could serve as an important platform for the regeneration of damaged bone tissue. In this study, a diverse range of unit cells and lattice structures featuring different pore structures of polylactic acid (PLA)/hydroxyapatite (HA) based scaffolds were modeled and designed. Structural analyses of the designed models were conducted in a simulation environment and their mechanical properties were compared with similar studies. The results suggest that PLA/HA-based scaffolds with different designs hold high potential for applications in bone tissue engineering.

**Keywords:** Polylactic Acid, Scaffold, Design, Structural Analysis, Mechanical Strength.

## 1. INTRODUCTION

Bone tissue defects that occur owing to many reasons such as trauma, metabolic disorders, and aging are important health problems that greatly affect the patients' quality of life [1]. Bone is one of the most commonly transplanted tissue for biomedical therapy [2]. However, bone transplantation poses a significant clinical difficulty in practice due to its many disadvantages, such as causing new bone damage in the body and requiring a second surgical procedure for the patient, inability to obtain sufficient grafts for the treatment of major damage, and difficulties in shaping the graft. At this point, scaffolds that have emerged in order to overcome the limitations of existing methods aim at functional bone regeneration based on the interaction of biomaterials, cells and biosignal molecules [3].

In the fabrication of scaffolds, in order to best imitate bone, which is a natural composite material, biopolymers with biocompatible and biodegradable properties and bioactive

ceramics, that have the ability to bond with living bone by creating an apatite interface layer with their osteoinductive properties are used together to make them structurally more compatible materials are being developed. Polylactic acid (PLA) is a polymeric scaffold material that has been widely investigated for bone tissue applications and has been approved by the US Food and Drug Administration (FDA) for clinical trials [2,5]. PLA attracts much attention with its excellent biocompatibility, bioabsorbability and biodegradability with non-toxic by-products [2, 6-9]. Additionally, it has multifunctional applications in different fields such as drug delivery systems, antimicrobial products, medical implant devices, and 3D printed scaffold manufacturing for bone tissue applications [9].

However, PLA's lack of ability to facilitate cell adhesion and proliferation on its surface due to its weak cellular binding ability restricts its wider applications [2, 5]. In addition, the low

mechanical strength of polymeric materials is insufficient to transmit mechanical force in load-bearing applications. In studies conducted to overcome this situation, the surface properties of the produced scaffolds were examined and it was determined that they needed a hard surface for the attachment and proliferation of anchorage-dependent primary cells, and when they were reinforced with calcium phosphate-based bioceramic materials, modification of the surface topology and improved mechanical strength were determined. Hydroxyapatites (HA), which are frequently used among calcium phosphates, are promising as scaffold materials with their excellent biological behavior such as high osteoconductivity and osteoinductivity, as well as promoting cell attachment of scaffolds, exhibiting bioactive properties with their reactive surfaces, and high osteoconductivity and osteoinductivity [2, 13].

Lattice structures are 3D structures consisting of unit cells that repeat each other regularly and are most preferred in the biomedical field today [14]. When the studies on additive manufacturing are examined, it has been seen that the interest in lattice structures has increased in recent years due to their high strength/weight ratio and homogeneous porosity distribution [15]. Computer-aided design programs such as AutoCAD, SolidWorks and 3DS are used for 3D modeling of these lattice structures with complex geometries [16-17]. Structures with mechanical properties close to native bone and in which porosity can be controlled easily developed using the additive manufacturing method [18]. Li et al. [19] produced Ti6Al4V implants with a honeycomb lattice structure using the electron beam melting method, which is one of the additive manufacturing method. According to their results, they stated that the produced implants have high strength with an elasticity modulus close to that of human bone and can be used in implant applications. However, the most advanced simulation method used in static analysis in bone tissue design is the finite element model. In this model, ANSYS analyzes that can create approximate values close to reality come to the fore. In the study conducted by Chethan et al. [20], static analyzes were carried out with ANSYS finite element software on the hip prosthesis stem design, and the optimum material and geometric design were

determined by determining the tensile deformations.

Production of properly designed scaffolds using appropriate materials is critical for bone tissue applications. Although porosity, pore size and pore morphology have a significant effect, the scaffolds produced with a porous structure also allow bone growth and attachment [21-22]. In addition, scaffolds with inter-connected and highly porous structure can be obtained by a wide variety of methods such as solvent casting, particle leaching, gas foaming, solvent evaporation, laser beam processing and freeze drying [22-23]. However, the fact that the scaffolds produced have a closed pore morphology is a disadvantage of traditional methods. Moreover, it has been observed that PLA-based scaffolds produced with these methods have less internal connections between pores due to their low degradation rate, poor permeability and non-uniform structure [23]. On the other hand, 3D printing method enables the rapid, accurate and reliable fabrication of scaffolds that can fill the defective area in the desired geometries, where control of the pore size in the tissue scaffolds, homogeneous porosity distribution and an open porosity structure are obtained [4, 24]. Designing alternative structures with improved mechanical properties is very important for bone tissue applications. Structural analysis of the scaffolds designed with these features can be carried out in a simulation environment and structures with properties similar to natural bone can be obtained in a practical way. The predictability of the calculations made with this method is quite advantageous as it can obtain results close to experimental studies.

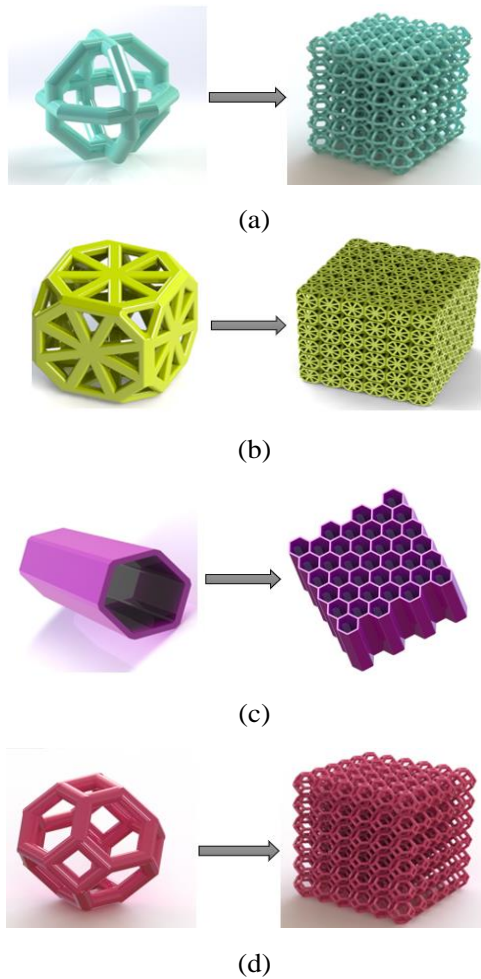
In this study, different designs of PLA/HA-based tscaffolds for use in bone tissue applications were obtained by modeling four different unit cell and lattice structures. The created models were defined in ANSYS Workbench software, static analyzes were carried out and the results were examined comparatively with similar studies.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Three Dimensional (3D) Modeling

In this study, 3D modeling was performed using SolidWorks software to create four different unit cell models and lattice structures for bone tissue applications. Octagonal unit cell diameter is

0.813 mm, kelvin unit cell diameter is 0.748 mm, and honeycomb unit cell wall thickness is 0.362 mm [25]. The wall thickness of the unit cell in octagonal design was determined as 0.5 mm and the strut length was determined as 1.686 mm. The lattice structure models created by combining unit cells were then transferred to Ansys Workbench software. The appearance of the created models is shown in Figure 1.



**Figure 1.** 3D unit cell and lattice structures; (a) octagonal, (b) angular-octagonal, (c) honeycomb, (d) kelvin model.

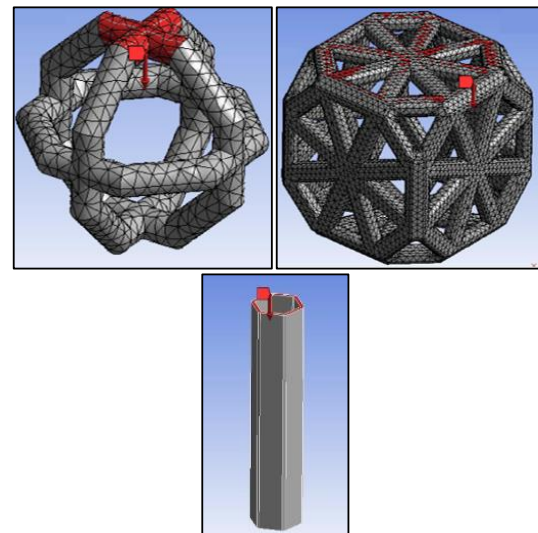
## 2.2. Finite Element Model

To finite element analysis, PLA and PLA/HA combinations were determined as linear and isotropic, and are shown in Table 1. In order to see and compare the effect of the biomaterials, material definitions as 100 %, 75 % PLA and 25 % HA by weight, respectively, were defined separately on these models via ANSYS Workbench. After creating material properties for 3D design models, mesh assignment was carried out. To obtain the optimum design, first the stress and deformation values on the unit cells

were evaluated. Optimization studies were carried out on the models to determine the most appropriate element sizes. As a result of the studies, the element size of the honeycomb and octagonal models was determined as 0.181 mm, while the element size of the octagonal model was determined as 0.4 mm. In addition, the results were examined by comparing them with finite element studies on similar models [26, 27].

**Table 1.** Mechanical properties of materials.

Properties	PLA	HA	PLA/HA
Density ( $\text{g/cm}^3$ )	1.24	3,16	1.72
Elastic Modulus (MPa)	1280	7000	2710
Poison Rate	0.36	0.27	0.34
Yield strength (MPa)	70	-	52.5
Shear Modulus (MPa)	470.59	2755.9	1031.1
Reference	[26]	[27]	



**Figure 2.** 20 N force applied on the mesh unit cells.

Boundary conditions are defined for 3D finite element models as shown in Figure 2. First of all, the optimum design was determined by analyzing unit cells with PLA and PLA/HA combinations to see the effect of the design. After applying 20 N as a preliminary force to force the unit cells in the compression direction, the force value to be applied on the optimum design was taken as 500 N. It was aimed to evaluate the stress values by applying axial load to the created bone models, considering that the average human weight is 80 kg. Unit cells are fixed by restricting their movements at the bottom and the compression force is defined from the top.

### 3. EXPERIMENTAL FINDINGS

In the finite element analysis results, the Von Mises stress distribution was determined to evaluate the material strength as a criterion and the total deformation amount was determined to determine the rigidity. The obtained data are given in Table 2.

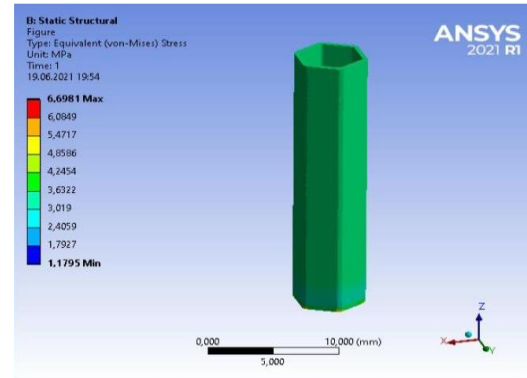
**Table 2.** Material strength values obtained from finite element analysis results.

Birim hücreler	Malzeme	Total deformasyon (mm)	Von-Mises (MPa)
Honeycomb	% 100PLA	0.0679	6.69
	% 75PLA % 25HA	0.032	6.49
Octagonal	% 100PLA	0.1958	53.02
	% 75PLA % 25HA	0.0927	53.13
Angular-octagonal	% 100PLA	0.455	140.09
	% 75PLA % 25HA	0.2182	141.1

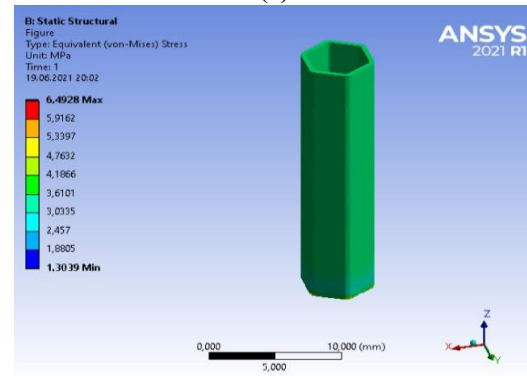
Among three different unit cells, the highest Von Mises stress value obtained when PLA material defined was calculated as 140.09 MPa in the angular-octagonal model. It is accepted that the probability of fracture increases with the maximum Von Mises stresses obtained by finite element analysis. Considering the finite element analysis unit cell results, the honeycomb unit cell has the lowest Von Mises stress value. The lowest stress value in the PLA honeycomb model is 6.69 MPa. In the PLA/HA honeycomb model, the lowest Von Mises stress value decreases to 6,493 MPa. It was observed that the Von Mises stress value increased to 53.02 MPa in the PLA octagonal model and 53.13 MPa in the PLA/HA octagonal model. While the Von Mises stress was 140.09 MPa in the PLA octagonal model, this value increased to 141.1 MPa in the PLA-HA octagonal model.

The geometry of bone tissues greatly affects their mechanical properties and behavior. For this reason, comparisons were made by looking at the total deformations on the models. While the total deformation was 0.1958 mm in the PLA octagonal model, the total deformation was reduced and calculated as 0.0927 mm in the PLA/HA octagonal model. The total deformation is 0.455 mm in the PLA angular-octagonal model and 0.2182 mm in the

PLA/HA model. Finally, the total deformation was 0.0679 mm in the PLA honeycomb model and 0.032 mm in the PLA/HA model. Compared to other models, the lowest total deformation value was obtained in the honeycomb model. According to Von Mises criteria and total deformation results, the optimum and most critical model was determined to be the honeycomb model.



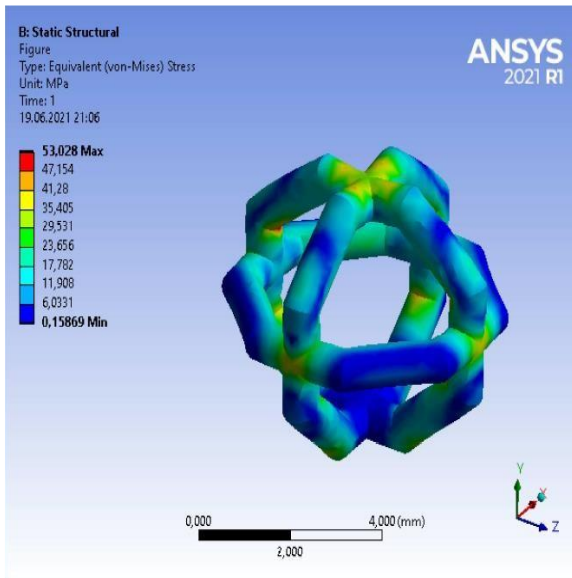
(a)



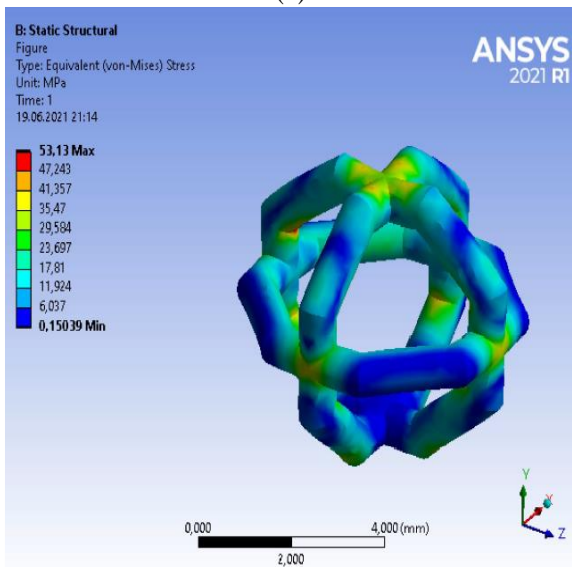
(b)

**Figure 3.** Honeycomb unit cell (a) % 100 PLA (b) % 75 PLA- % 25 HA.

Based on this, 500 N force was applied on the honeycomb lattice structure. Figures 3, 4 and 5 show Von Mises stress distributions on the models. Figure 6 shows the total deformation values when 500 N force is applied (a) PLA honeycomb lattice structure (b) 75% PLA-25% HA added honeycomb lattice structure. In the PLA honeycomb lattice structure, the Von Mises stress value was found to be 3,543 MPa and the total deformation value was 0.043 mm. In the PLA/HA honeycomb lattice structure, the Von Mises stress value is 3.513 MPa and the total deformation value is 0.020 mm. When evaluated in terms of rigidity and strength, it was determined that the use of PLA alone was insufficient in all models.



(a)

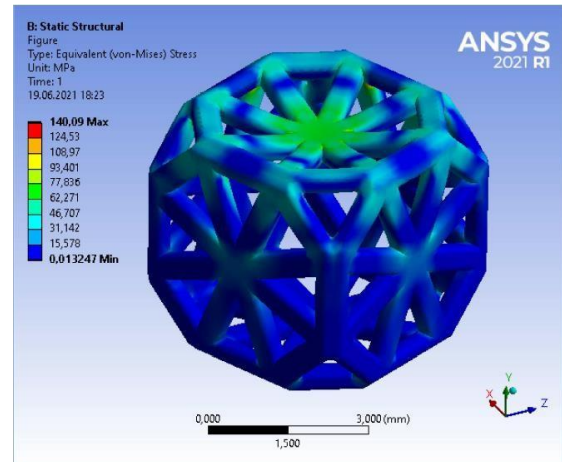


(b)

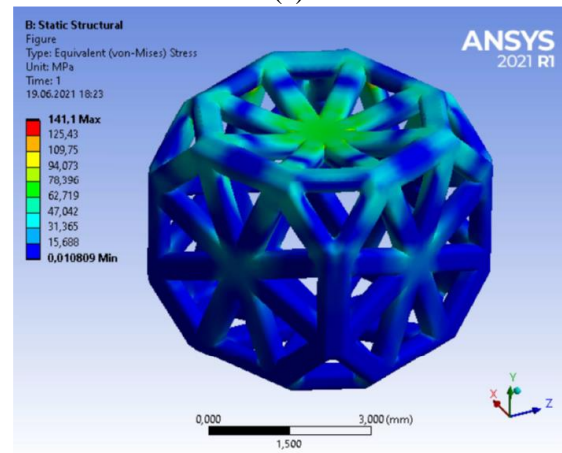
**Figure 4.** Octagonal unit cell (a) % 100 PLA (b) % 75 PLA- % 25 HA.

#### 4. DISCUSSION

Today, 3D printing method is one of the methods that attracts attention in bone tissue applications. Adapting computer-aided design to bone tissue engineering with 3D printing technology greatly increases production precision and repeatability compared to traditional methods. It is very advantageous that the 3D printing method provides precise modeling ability of bone tissue models and high efficiency production [29].



(a)

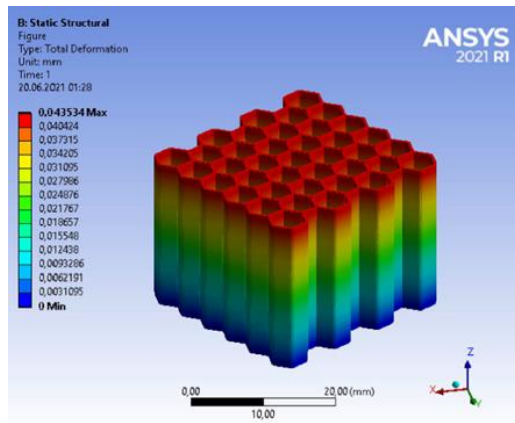


(b)

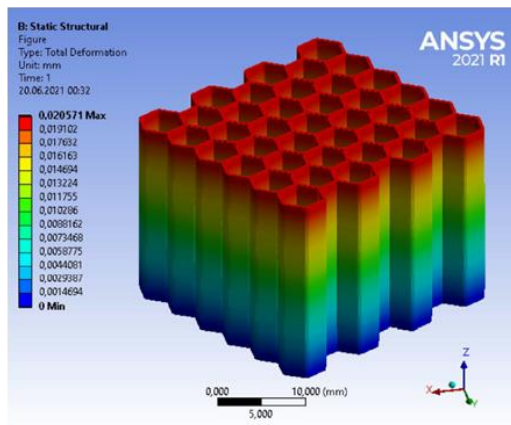
**Figure 5.** Angular-octagonal unit cell (a) % 100 PLA (b) % 75 PLA- % 25 HA.

Within the scope of this study, the expansion of the usage areas of 3D printers and their suitability in bone tissue engineering applications were investigated. In this regard, modeling and analysis were carried out using the finite element analysis method. In the designed models, the effect of both the design and the biomaterials used on the design was evaluated by taking into account the total deformation and stress values obtained. 3D printing methods allow the manufactured scaffolds to imitate natural bone, thanks to the high controllability of the structures. Comparing and evaluating the results of analyzes designed in a simulation environment provides advantages in terms of cost and optimization. During bone design and fabrication, the selection of biomaterials, internal structure, pore diameter and porosity ratio, anatomical external geometry, permeability and selection of printing techniques appropriate to the design are very important. In addition, in order to obtain good

results on models in 3D printing, layer thickness, extrusion speed, nozzle exit pressure, viscosity of the material to be used as bioink and table temperature are the parameters that need to be taken into consideration. Increasing printing speed or layer thickness may cause deterioration in surface quality. Similarly, if these parameters cannot be adjusted appropriately, negative situations such as premature cooling of the filament and weakening of the structure on the part may be observed [28].



(a)



(b)

**Şekil 6.** The total deformation values measured by applying a 500 N force to (a) the PLA honeycomb lattice structure and (b) the 75% PLA-25% HA added honeycomb lattice structure.

In the study by Adhikari et al. [30], it was reported that the optimum viscosity in 3D printed alginate/chitosan/HA scaffolds prevented the collapse of HA nanoparticles, the lateral pores of the scaffolds protected the integrity of the scaffold, and the produced scaffolds were suitable for 3D printing. Moreover, viscous inks are also suitable for maintaining the height of the scaffolds after

printing [31], although it is known that extrusion becomes difficult and uninterrupted ink flow is disrupted with high viscosity bioinks. Since trouble-free extrusion is essential for production, the extrudability of the designed structure is extremely important. In the study, it can be said that the HA-containing design is more viscous than the 100% PLA-based design. This is because the increase in HA concentration increases the viscosity of the bioink. Therefore, for extrusion of high viscosity inks with HA loadings, the printing pressure should be higher than that of PLA-based design [30].

In addition to 3D design, determining the mechanical load range is very important. Bone tissue is constantly exposed to mechanical loads at varying intervals. As a result, a certain tension occurs both in the bone structure and in the tissue. For this reason, balancing the ductility of the polymer material and the brittleness of the ceramic material Ca-P-based HA is of great mechanical and biological importance [32]. On the other hand, some errors are encountered during production in the melt deposition modeling (FDM) method, which is another additive manufacturing method. One of these errors is that the parts with low thickness have low strength and the diameter of the nozzle through which the material flows also affects this. In general, ribs, which are support materials, break [33]. Feds break when removing material or during the initial assembly phase. As a solution to this situation, the thickness of the ribs should be made 1/3-1/2 thicker than the general wall thickness [34]. When rib thicknesses are made at these ratios, collapse on the outer surface of the rib area can be prevented while the part is produced in the injection machine.

It is known that there are two parameters for a cell-based bone implantation: the skeletal design and the cell assembly of this design [35]. In bone tissue engineering applications, PLA is a biomaterial with high biocompatibility and FDA approval for clinical applications. However, HA addition to PLA provides a dynamic 3D bone tissue by increasing the activation of osteoblast cells. In a study, it was reported that more surface roughness was obtained in HA-containing scaffolds compared to scaffolds designed with 100% PLA [32]. Increasing the surface roughness and expanding the surface area of the produced tissue scaffolds

to adhere to living cells helps to increase the cell association rate. It has also been reported that FDM technology, which has low processing costs, can be successful in PLLA/HA hybrid scaffolds with up to a maximum of 30% ceramic contribution and causes relatively weak osteoblast activity [35]. Studies have shown that smaller macropores and higher fracture energies can be achieved by increasing the gelatin ratio in gelatin-containing tissue scaffolds when performing 3D printing [36-37]. At the same time, it has been determined that this method allows the designed model to be successfully obtained by providing the ability to print at appropriate viscosity values. In another investigation [38], it was found that a PLA scaffold with 15% HA by weight, created using an extrusion-based 3D printing method, could withstand a maximum stress of 3 MPa at 70°C. Research conducted by Ziminia et al. reported [39] that a PLA scaffold with a 15% weight additive exhibited a maximum strength of  $2.47 \pm 0.19$  MPa, which decreased to  $1.41 \pm 0.37$  MPa upon increasing the HA content to 20% by weight. Comparable compressive strength values were observed in chitosan/gelatin/HA 3D scaffolds, which demonstrated a strength of 4.16 MPa [40].

## 5. CONCLUSION

Finite Element Analysis is a well-respected method for biomechanical evaluations, offering significant advantages due to its capacity to produce predictive outcomes that closely align with experimental research findings. This study focuses the design and fabrication of tissue engineering scaffolds through the integration of computational strategies with 3D printing technologies. We conducted an extensive examination of various computational modeling and simulation techniques, especially for developing PLA-based tissue scaffolds. Computational approaches facilitate the prediction of scaffold characteristics and their behavior under various conditions. Scaffolds designed using computational methods are characterized by their reproducibility, precision, and adaptability, making them suitable for fabrication via 3D printing. The experimental validation of these computational designs showed a high degree of agreement between the simulated and actual results. Despite some challenges related to computational techniques and 3D printing technologies, the literature strongly supports the

benefits of their combined use in the design and production of scaffolds. Our analysis of models specifically designed for 3D printing indicated that the PLA honeycomb structure, enhanced with 25% HA, yielded the best results. However, an increase in HA content was associated with a decrease in ultimate strength in the PLA constructs. Although the strength values of the produced bone tissue scaffolds are lower than that of natural bone, making them suitable for non-load-bearing areas of the body like the facial region, the achieved strength levels are consistent with those reported in similar studies. Variations in production parameters, as well as in the design and analysis stages, significantly affect the mechanical properties and overall quality of the final product. Precise adjustment of each parameter is essential in the 3D printing process. In conclusion, this study highlights the increasing importance and potential of PLA/HA-based composite scaffolds in future tissue engineering research.

## REFERENCES

1. Shea, L.D., Wang, D., Franceschi, R.T., Mooney, D.J., "Engineered bone development from a pre-osteoblast cell line on three-dimensional scaffolds", *Tissue Engineering*, Vol. 6, Pages 605-617, 2000.
2. Mondal, S., Nguyen, T.P., Hoang, G., Manivagan, P., Kim, M.H., Nam, S.Y., & Oh, J., "Hydroxyapatite nano bioceramics optimized 3D printed poly lactic acid scaffold for bone tissue engineering application", *Ceramics International*, Vol. 46, Issue 3, Pages 3443-3455, 2020.
3. Burg, K.J.L., Porter, S., & Kellam, J.F., "Biomaterial developments for bone tissue engineering", *Biomaterials*, Vol. 21, Pages 2347-2359, 2000.
4. Bulut, B. & Duman, Ş., "Evaluation of mechanical behavior, bioactivity, and cytotoxicity of chitosan/akermanite-TiO<sub>2</sub> 3D-printed scaffolds for bone tissue applications", *Ceramics International*, Vol. 48, Issue 15, Pages 21378-21388, 2022.
5. Persson, M., Lorite, G.S., Kokkonen, H.E., Cho, S.W., Lehenkari, P.P., Skrifvars, M., & Tuukkanen, J., "Effect of bioactive extruded PLA/HA composite films on focal adhesion formation of preosteoblastic cells", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 121, Pages 409-416, 2014.
6. Garlotta, D., "A literature review of poly (lactic acid)", *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 9, Issue 2, Pages 63-84, 2001.



- 7.Nampoothiri, K.M., Nair, N.R., & John, R.P., "An overview of the recent developments in poly-lactide (PLA) research", *Bioresource Techno-logy*, Vol. 101, Issue 22, Pages 8493-8501, 2010.
- 8.Gentile, P., Chiono, V., Carmagnola, I., & Hat-ton, P.V., "An overview of poly (lactic-co-glycolic) acid (PLGA)-based biomaterials for bone tissue engineering", *International Journal of Mole-cular Sciences*, Vol. 15, Issue 3, Pages 3640-3659, 2014.
- 9.Revati, R., Majid, M.A., Ridzuan, M.J.M., Normahira, M., Nasir, N.M., & Gibson, A.G., "Mechanical, thermal and morphological characterisation of 3D porous Pennisetum purpureum/PLA biocomposites scaffold", *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 75, Pages 752-759, 2017.
- 10.Sui, G., Yang, X., Mei, F., Hu, X., Chen, G., Deng, X., & Ryu, S., "Poly-L-lactic acid/hydroxyapatite hybrid membrane for bone tissue regeneration", *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Bio-materials and the Korean Society for Biomaterials*, Vol. 82, Issue 2, Pages 445-454, 2007.
- 11.Cui, Y., Liu, Y., Cui, Y., Jing, X., Zhang, P., & Chen, X., "The nanocomposite scaffold of poly (lactide-co-glycolide) and hydroxyapatite surface-grafted with L-lactic acid oligomer for bone re-pair", *Acta Biomaterialia*, Vol. 5, Issue 7, Pages 2680-2692, 2009.
- 12.Hong, Z., Zhang, P., He, C., Qiu, X., Liu, A., Chen, L., Chen, X., & Jing, X., "Nano-composite of poly (L-lactide) and surface grafted hydroxya-patite: mechanical properties and biocompatibi-lity", *Biomaterials*, Vol. 26, Issue 32, Pages 6296-6304, 2005.
- 13.Zhou, H., & Lee, J., "Nanoscale hydroxyapati-te particles for bone tissue engineering", *Acta biomaterialia*, Vol. 7, Issue 7, Pages 2769-2781, 2011.
- 14.Zhang, X.Z., Leary, M., Tang, H.P., Song, T., Qian, M., "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding chal-lenges", *Current Opinion in Solid State and Mate-rial Science*, Vol. 22, Issue 3, Pages 75-99, 2018.
- 15.Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M., "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges", *Materials and De-sign*, Vol. 183, Pages 108-137, 2019.
- 16.Yuan, L., Ding, S., & Wen, C., "Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review", *Bioactive Materials*, Vol. 4, Pages 56-70, 2019.
- 17.Helou, M. & Kara, S., "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview", *International Journal of Computer Integrated Ma-nufacturing*, Vol. 31, Issue 3, Pages 243-261, 2018.
- 18.Fousová, M., Vojtěch, D., Kubásek, J., Jab-lonská, E., Fojt, J., "Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 69, Pages 368-376, 2017.
- 19.Li, X., Wang, C., Zhang, W., Li, Y., "Fabrica-tion and characterization of porous Ti6Al-4Vparts for biomedical applications using electron beam melting process", *Materials Letters*, Vol. 63, Pages 403-405, 2009.
- 20.Chethan, K.N., Zuber, M., Shenoy, S., Kini, C.R., "Static structural analysis of different stem designs used in total hip arthroplasty using finite element method", *Heliyon*, Vol. 5, Issue 6, Pages e01767, 2019.
- 21.Studart, A.R., Gonzenbach, U.T., Tervoort, E., Gauckler, L.J., "Processing routes to macroporous ceramics: a review", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 89, Issue 6, Pages 1771-1789, 2006.
- 22.Mutlu, B., Çaylak, S., & Duman, Ş. "Incorporation of cerium oxide into hydroxyapatite/chitosan composite scaffolds for bone repair", *Processing and Application of Ceramics*, Vol. 16, Issue 3, Pages 207-217, 2022.
- 23.Singh, D., Babbar, A., Jain, V., Gupta, D., Saxena, S., & Dwibedi, V., "Synthesis, characteri-zation, and bioactivity investigation of biomimetic biodegradable PLA scaffold fabricated by fused filament fabrication process", *Journal of the Brazi-lian Society of Mechanical Sciences and Enginee-ring*, Vol. 41, Issue 3, Pages 1-13, 2019.
- 24.Duman, Ş. & Bulut, B., "Effect of akermanite powders on mechanical properties and bioactivity of chitosan-based scaffolds produced by 3D-bioprinting", *Ceramics International*, Vol. 47, Issue 10, Pages 13912-13921, 2021.
- 25.Habib, F., Iovenitti, P., Masood, S., Nikzad, M., & Ruan, D., "Design and evaluation of 3D printed polymeric cellular materials for dynamic energy absorption", *International Journal of Ad-vanced*

Manufacturing Technology, Vol. 103, Issue 5, Pages 2347–2361, 2019.

26.Torres, J., Coteló, J., Karl, J., & Gordon, A.P., “Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives”, *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 67 Issue 5, Pages 1183-1193, 2015.

27.The Biomedical Engineering Handbook, Joseph D. Bronzino, Ed. CRC Press in Cooperation with IEEE Press, Boca Raton, FL, 1995.

28.Gurkan, U.A., El Assal, R., Yildiz, S.E., Sung, Y., Trachtenberg, A.J., Kuo, W.P., & Demirci, U., “Engineering anisotropic biomimetic fibrocartilage microenvironment by bioprinting mesenchymal stem cells in nanoliter gel droplets”, *Molecular Pharmaceutics*, Vol. 11, Issue 7, Pages 2151-2159, 2014.

29.Evlen, H., Özdemir, M.A., & Çalışkan, A., “Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri”, *PoliTeknik Dergisi*, Vol. 22, Issue 4, Pages 1031-1037, 2019.

30.Adhikari, J., Perwez, M. S., Das, A., & Saha, P., “Development of hydroxyapatite reinforced alginate–chitosan based printable biomaterial-ink”, *Nano-Structures & Nano-Objects*, Vol. 25, Pages 100630, 2021.

31.Liu, Q., Li, Q., Xu, S., Zheng, Q., & Cao, X., “Preparation and properties of 3D printed alginate–chitosan polyion complex hydrogels for tissue engineering”, *Polymers*, Vol. 10, Issue 6, Pages 664, 2018.

32.Russias, J., Saiz, E., Nalla, R.K., Gryn, K., Ritchie, R.O., & Tomsia, A.P., “Fabrication and mechanical properties of PLA/HA composites: A study of in vitro degradation”, *Materials science & engineering. C, Biomimetic and Supramolecular Systems*, Vol. 26, Issue 8, Pages 1289-1295, 2006.

33.Maden, H. & Kamber, Ö.Ş., “FDM teknoloji ile üretilen prototip parçalarının hataları ve hataların önlenmesi”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 2, Issue 1, Pages 40-51, 2018.

34.Sun, L. & Liu, X., “Control analysis of production and apparent quality of automobile large plastic parts”, *Procedia Engineering*, Vol. 16, Pages 438-443, 2011.

35.Guduric, V., Metz, C., Siadous, R., Bareille, R., Levato, R., Engel, E., Fricain, J.-C., Devillard, R., Luzanin, O., & Catros, S., “Layer-by-layer bioassembly of cellularized polylactic acid porous membranes for bone tissue engineering”, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Vol. 28, Issue 5, Pages 1-11, 2017.

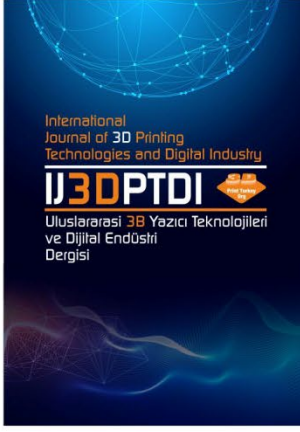
36.Azami, M., Rabiee, M., & Moztarzadeh, F., “Glutaraldehyde crosslinked gelatin/hydroxyapatite nanocomposite scaffold, engineered via compound techniques”, *Polymer Composites*, Vol. 31, Issue 12, Pages 2112-2120, 2010.

37. Ko, C.C., Oyen, M., Fallgatter, A.M., & Hu, W.S., “Effects of gelatin on mechanical properties of hydroxyapatite-gelatin nanocomposites”, *MRS Online Proceedings Library (OPL), Symposium L – Mechanical Behavior of Biological and Biomimetic Materials*, Vol. 898, 2005.

38.Senatov, F.S., Niaza, K.V., Zadorozhnyy, M.Y., Maksimkin, A.V., Kaloshkin, S.D., & Estrin, Y.Z., “Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 57, Pages 139-148, 2016.

39.Zimina, A., Senatov, F., Choudhary, R., Kolesnikov, E., Anisimova, N., Kiselevskiy, M., Orlova, P., Strukova, N., Generalova, M., Manskikh, V., Gromov, A., & Karyagina, A., “Biocompatibility and physico-chemical properties of highly porous PLA/HA scaffolds for bone reconstruction”, *Polymers*, Vol. 12, Issue 12, Pages 2938, 2020.

40.Hu, X., Man, Y., Li, W., Li, L., Xu, J., Parungao, R., Wang, Y., Zheng, S., Nie, Y., Liu, T., & Song, K., “3D bio-printing of CS/Gel/HA/Gr hybrid osteochondral scaffolds”, *Polymers (Basel)*, Vol. 11, Issue 10, Pages 1601, 2019.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# ÜÇ BOYUTLU YAZICIYLA ÜRETİLMİŞ YÜZEY BASKILI ELEKTROT BENZERİ SİSTEMİN ELEKTROKİMYASAL UYGULAMASI

ELECTROCHEMICAL APPLICATION OF SCREEN  
PRINTED ELECTRODE-LIKE SYSTEM MADE WITH A  
THREE-DIMENSIONAL PRINTER

**Yazarlar (Authors):** Levent Özcan<sup>ID</sup>, Ahmet Fatih Yuran<sup>ID</sup>


**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Özcan L., Yuran A. F., “Üç Boyutlu Yazıcıyla Üretilmiş Yüzey Baskılı Elektrot Benzeri Sistemin Elektrokimyasal Uygulaması” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 80-91, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1324695

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# ÜÇ BOYUTLU YAZICIYLA ÜRETİLMİŞ YÜZEY BASKILI ELEKTROT BENZERİ SİSTEMİN ELEKTROKİMYASAL UYGULAMASI

Levent Özcan<sup>a</sup> , Ahmet Fatih Yuran<sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [leventozcan@aku.edu.tr](mailto:leventozcan@aku.edu.tr)

(Geliş/Received: 08.08.23; Düzeltme/Revised: 28.01.24; Kabul/Accepted: 02.04.24)

## ÖZ

Elektrokimyasal sensör ve biyosensörlerde kullanılan elektrotların ve elektrot sistemlerinin yapılmasında üç boyutlu yazıcıların kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlardan biri olan düşük maliyet ile üretim yapılabilmesi, son yıllarda bu alandaki çalışmaların giderek artmasında itici güç olmuştur. Elektrokimyasal ölçümlerin gerçekleştirilebildiği ve çoğu tek kullanımlık olan yüzey baskılı elektrotlar pek çok sensör/biyosensör sisteminde kullanılmaktadır. Yüzey baskılı elektrotlara benzer bir tasarıma sahip ve benzer bir mantıkla çalışan alternatif elektrotların üç boyutlu yazıcılarla üretilebilirliğinin gösterilmesi bu çalışmanın ana hedefidir. Elektrot malzemesi olarak kullanılan kalem ucu grafit elektrot yaygın bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle üretilen sistemde çalışma, referans ve karşıt elektrot olarak kullanılmıştır. Maliyetin düşürülmesi ve ulaşılabilirlik üç boyutlu yazıcılar açısından da göz önünde bulundurulmuş ve FDM tipi yazıcı tercih edilmiştir. FDM tipi yazıcı kullanılarak elde edilen yüzey baskılı elektrot benzeri sistem parasetamolün elektrokimyasal tayinlerinde başarıyla kullanılmıştır. Çalışma, karşıt ve referans elektrot olarak 0,9 mm kalınlığındaki 2B kalem ucunun kullanıldığı bu sistemde dönüşümlü voltametri yöntemi kullanılarak 4,0 mM parasetamol içeren pH 7,0 fosfat tamponu çözeltisinde 0,43 V değerinde yükseltgenme piki elde edilmiştir. Sistem aynı zamanda referans elektrot olarak Ag/AgCl ve karşıt elektrot olarak Pt telin kullanıldığı şartlarda denenmiştir. Sonuçlar parasetamol için elde edilen yükseltgenme akım değerinin birbirine çok yakın olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 3 Boyutlu Yazıcı, Kaynaştırma Biriktirme Modellemesi, Yüzey Baskılı Elektrot, Kalem Ucu Elektrot, Elektrokimyasal Sensör/Biyosensör.

## ELECTROCHEMICAL APPLICATION OF SCREEN PRINTED ELECTRODE-LIKE SYSTEM MADE WITH A THREE-DIMENSIONAL PRINTER

### ABSTRACT

The use of three-dimensional printers in the production of electrodes and electrode systems used in electrochemical sensors and biosensors provides significant advantages. Being able to produce with low cost, which is one of these advantages, has been the driving force in the increasing number of studies in this field in recent years. Surface-printed electrodes, most of which are disposable, where electrochemical measurements can be performed, are used in many sensor/biosensor systems. The main goal of this study is to demonstrate the producibility of alternative electrodes, which have a similar design to surface-printed electrodes and work with a similar logic, with three-dimensional printers. The pencil graphite electrode used as the electrode material was used as a working, reference, and counter electrode in the produced system due to its widespread availability and low cost. Cost reduction and accessibility were also considered in terms of three-dimensional printers and FDM type printer was preferred. The screen printed electrode-like system obtained using an FDM-type printer has been successfully used in the electrochemical determination of paracetamol. In this system, in which a 2B

pen tip with a thickness of 0.9 mm is used as the working, counter and reference electrode, an oxidation peak of 0.43 V was obtained in pH 7.0 phosphate buffer solution containing 4.0 mM paracetamol by using the cyclic voltammetry method. The system was also tested under conditions where Ag/AgCl was used as the reference electrode and Pt wire was used as the counter electrode. The results showed that the oxidation current values obtained for paracetamol were very close to each other.

**Keywords:** 3D Printer, Fusion Deposition Modelling, Screen Printed Electrode, Pencil Graphite Electrode, Electrochemical Sensor/Biosensor.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Biyosensörler ve 3D Yazıcılar

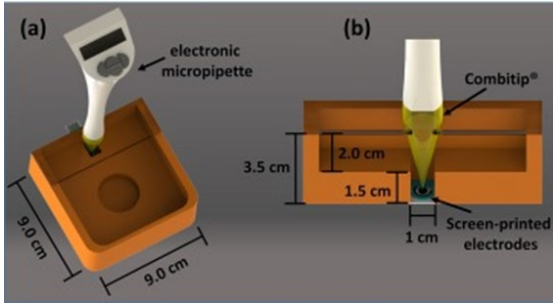
Biyosensörler ilaçlar, metabolitler, gıda maddeleri, vitaminler, antibiyotikler gibi bazı bileşiklerin yanında mikroorganizmaların da tespitinde kullanılmaktadır. Bunların dışında biyokimyasal oksijen ihtiyacı, toksisite ve mutajenite testleri gibi alanlarda uygulamaları da bulunmaktadır. Biyosensörler tıp, eczacılık, gıda, tarım, çevre kirliliği alanları ile pek çok endüstriyel faaliyette kalite kontrolü ve durum tespiti gibi uygulamalarda kullanıldıklarından oldukça önemlidir. Bir biyosensör, temel olarak biyolojik bir olay ile ilişkili olan sinyali elektriksel bir cevaba dönüştürür [1-2]. Biyosensörlerin temel bileşenlerinden biri olan ve tayin edilecek madde (analit) ile spesifik etkileşimlerde bulunan türlere genelde biyoreseptör ismi verilir. Enzimler ve antikolar bu biyoreseptörlerden en sık kullanılanlarıdır. Antikolar hem antijenlere bağlanırlar hem de kimyasal bir dönüşümü katalize ederler. Ayrıca nükleik asitler ve karbonhidratlar da özel amaçlarla kullanılan bazı biyosensörlerde spesifik etkileşimleri sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Biyosensör üretiminde pek çok biyoreseptörün kullanımı gerekmekte olup analit ile gerçekleşecek spesifik etkileşimler sonucu elde edilecek sinyalin türüne göre farklı tekniklerden faydalanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan teknikler arasında spektroskopik, piezoelektrik, termal, alan etkili transistör ve elektrokimyasal teknikler yer alır [3-7]. Özellikle elektrokimyasal teknikler kullanıldığında elde edilen sinyallerin doğrudan elektriksel alanla ilişkili (gerilim, akım, direnç vb.) olması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle elektrokimyasal sensörler veya biyosensörler oldukça geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [8]. Bu uygulamalarda Au, Pt gibi soy metaller ile karbon temelli elektrot malzemeleri farklı boyut, geometri ve şekillerde kullanılmaktadır [9-11]. Laboratuvarlarda araştırma amaçlı çalışmalarda bu elektrotlar gerekli temizleme

veya ön işlemlerin ardından defalarca kullanılabilir. Bununla beraber rutin ölçümlerde kullanılmak üzere tek kullanımlık elektrotlar da yaygınlaşmaya başlamıştır. Nispeten daha ucuz olması nedeniyle karbon temelli elektrot malzemeleri tek kullanımlık elektrotlarda tercih edilmektedir [12]. Ayrıca tekrarlanabilir ölçümlerin elde edilmesi için gerekli bazı prosedürler ticari olarak satın alınan tek kullanımlık elektrotların fiyatlarının yeterince düşmesini engellemektedir. Bu nedenle mevcut imkânlar kullanılarak laboratuvar şartlarında nispeten ucuz ve tek kullanımlık elektrot üretimine yönelik alternatifler üzerinde daha fazla çalışılması gerekmektedir. Önemli bir alternatif üç boyutlu yazıcıların (3D) elektrot ve elektrotlar ile entegre bileşenlerin üretiminde kullanılmasıdır. 3D yazıcı teknolojisindeki gelişmeler sensör ve biyosensörlerde kullanılan ekipmanların üretimine yönelik olarak bu teknolojinin kullanımını yaygınlaştırmaya başlamıştır [13-15].

Ayrıca tek kullanımlık elektrot malzemelerinin yanında bu elektrotların entegre edildiği mikroakışkan sistemler gibi düzeneklerin üretiminde de 3D yazıcılar kullanılmaktadır. Bonyár vd. [16] biyosensörlerde kullanılan mikroakışkanların hareketini kontrol edecek mekanizmaların 3D yazıcılar ile üretimi üzerine yeni bir metot önermişler ve mikro akışkan içeren biyosensörlerin üretiminin 3D yazıcılar ile kolaylaşacağını belirtmişlerdir.

Roda vd. [17] yaptıkları çalışmada 3D yazıcılar ile akıllı telefona uyumlu çalışabilecek bir biyosensör aparatı üretmişlerdir. Bu aparat üzerinde biyosensörün yerleştirilebileceği özel bir hazne bulunmaktadır. Böylece biyosensörden ölçümlerin okunabilmesi için sadece bir akıllı telefon yeterli olabilmektedir. Gowers vd. [18] subkutanöz insan mikrodializatının analizi için kullanılacak biyosensördeki iğne tutucu aparatları 3D yazıcı ile üretmiştir. Ürettikleri sensör FDA onaylı

mikrodiyaliz problemleri ile uyumlu olarak çalışmaktadır. Dias vd. [19] kâğıt esaslı enzimatik reaktörleri kullanarak glikoz ölçümleri yapacak bir biyosensör üzerinde çalışmış ve biyosensörün seri enjeksiyon analizi için kullanılacak olan hücrelerini 3D yazıcı ile üretmiştir (Şekil 1). 3D yazıcı ile üretilen bu yapıların maliyetinin oldukça düşük olduğu ve üretim süresinin dört saat civarında olduğu bildirilmiştir. 3D yazıcı ile üretilen hücre ve geleneksel yöntemlerle üretilen hücreler arasında deneysel karşılaştırmalar yapılmış, aralarında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür.



**Şekil 1.** (a) Enjeksiyon analizi için 3D yazdırılmış hücrenin düzeni ve (b) elektrokimyasal ölçümler için yüzey baskılı elektrotlarla bağlantıyı gösteren şema [19].

## 1.2. Elektrokimyasal (Biyosensörlerde Kalem Ucu Elektrotun Kullanımı

Elektrokimyasal sensör ve biyosensör uygulamalarında farklı elektrot malzemeleri kullanılmakta olup bunlar içinde karbon temelli olan elektrotlar pek çok uygulamada tercih edilmektedir. Karbon kökenli elektrot malzemeleri arasında son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan elektrot malzemelerinden biri de kalem ucu elektrottur. Kararlılığının iyi olması, daha düşük toksisitesi, tek kullanımlık olabilmesi, tekrarlanabilir sonuçlar vermesi kalem ucu elektrotun (KUE) önemli üstünlükleri arasındadır [20]. Pishko vd. [21] tarafından KUE'un kullanıldığı ilk biyosensör çalışmasından bu yana yukarıda bahsedilen özelliklerinin yanında ucuz ve kolay ulaşılabilir olmasının da etkisiyle kullanımı yaygınlaşmıştır.

Kalem ucu, grafit tozu ve kilin (bağlayıcı madde olarak kullanılan) oluşan su içerisindeki karışımının ekstrüzyonu ve ardından sertlik kazanması için 1000 °C'ye kadar ısıtılmasıyla üretilir. Balmumu banyosuna daldırılarak gözeneklerin dolması sağlanan kalem uçları bu

işlem ile pürüzsüz bir görünüm kazanır [22]. Ekstrüzyon karışımındaki grafit/kil oranına bağlı olarak, üreticiler arasında da farklılık gösterebilen çeşitli sertlik çeşitlerine sahiptir. H sertlik derecesindekiler daha düşük grafit/kil oranına sahip olup daha sert yazı hissi verir. B derecesindekiler ise daha yüksek grafit içerdiğinden daha yumuşaktır ve koyu yazar. Kütlece %68 grafit, %26 kil ve %5 balmumundan oluşan yaklaşık bir bileşim, orta sertlikteki HB ölçeğine karşılık gelmektedir [23]. Kilin kırılkan karakteri nedeniyle ince uçlar kolaylıkla kırılabilir ve bunun önlenmesi için ısıtılardan sonrası esnek bağlanma sağlamak amacıyla ilave bir polimer kullanımını gerektirmektedir [24].

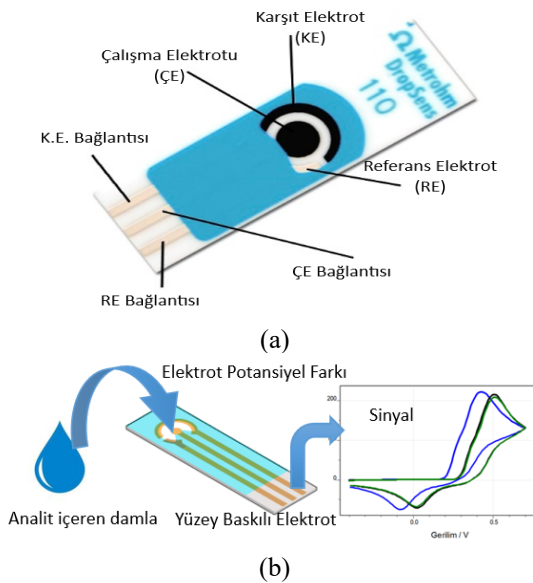
Grafit oranlarının farklılığı nedeniyle elektrotların elektriksel iletkenlikleri farklılık göstermektedir [25]. KUE'un yüzeyinin modifiye edilmeden kullanıldığı durumlarda elektrokimyasal performansı belli oranda etkileyecek bir özellik olduğu için elektriksel iletkenlikteki bu farklılıklar göz önünde bulundurularak çoğu çalışmada farklı derecelere sahip elektrotlar kıyaslamalı olarak test edilmektedir. 6B [26] ve 8B [12] gibi kalemlerin, üstün elektrokimyasal performansı literatürdeki çalışmalar ile gösterilmiştir. Bununla beraber sertlikteki (kil içeriği) çeşitlilik ve belirli bir kalem markasının kendi içinde çeşitliliği de elde edilen performans üzerinde etkili olmaktadır [24, 27-28]. Örneğin, analjezik bir ilaç aktif madde olan parasetamolün tayininde 5H türü KUE ile 2B ile elde edilenlere göre daha yüksek yükseltgenme piki elde edilmiştir [29]. Kafeik asit tayininde ise HB türü KUE ile 2B, 2H ve 5H ler ile elde edilenlere kıyasla daha iyi sinyal-gürültü oranı gözlenmiştir [30].

Ayrıca yüzeyinin kolayca modifiye edilebilmesi sayesinde elektrokimyasal sensör ve biyosensör çalışmalarında da KUE yaygın olarak kullanılmaktadır. KUE'un yüzeyinin iletken polimerler [31-32] nanoparçacıklar [33-34], inorganik, organik veya kompleks bileşikler [35-37] ile modifikasyonu ile elde edilen elektrotlar biyolojik önemi olan moleküllerin elektrokimyasal tayinlerinde başarıyla kullanılmıştır.

### 1.3. Elektrokimyasal Sensör veya Biyosensörlerde Kullanılan Yüze Baskılı Elektrotlar

Elektrokimyasal biyosensörlerde biyolojik bir sinyali ölçülebilir bir elektronik sinyale çevirir. Biyolojik sinyal çoğunlukla akım veya gerilim olabilir. Bu sinyallerin elde edilmesi sürecinde yüze baskılı elektrotlar (Screen printed electrodes, SPE's) son yıllarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır [38]. Yüze baskılı elektrotlar düşük üretim maliyeti ve seri üretime uygunluğu ile yeni sensör/biyosensör uygulamalarında her geçen gün daha sık kullanılmaktadır [39].

Şekil 2'de görülen yüze baskılı elektrot sisteminin üzerinde çalışma, karşıt ve referans elektrot vazifesi görecektir elektrotlar mümkün olduğunca yakın konumlanmıştır ve çoğu durumda bir damla analit çözeltisi ölçüm yapmak için yeterli olmaktadır. Çok daha düşük hacimlerde ölçüm yapabilecek yüze baskılı elektrot yapımına yönelik çalışmalar da yapılmaktadır [40]. Analitik amaçlarla kullanımı düşünüldüğünde elektronların katı elektrot yüzeyi ve çözelti ara yüzeyinden kolay ve hızlı bir şekilde aktarılması önemlidir. Elektrokimyasal ölçümlerde yaygın olarak kullanılan geleneksel elektrotların yüzey alanları  $\text{mm}^2$ 'ler düzeyindedir. Ancak hem elektrokimyasal ölçümlerdeki avantajları hem de minyatürize edilmiş ve taşınabilir sistemlere olan ihtiyaç nedeniyle mikro boyutlardaki elektrotlara olan ilgi artmaktadır [41-42].



**Şekil 2.** (a) Yüze baskılı elektrot [43] ve (b) Yüze baskılı elektrot üzerinde voltametrik olarak elde edilen sinyal [44].

Özellikle biyolojik öneme sahip moleküllerin tayinleri söz konusu olduğunda düşük hacimdeki numunelerde ölçüm yapılması gerekebilmektedir. Bu durum bazı vücut sıvılarının çok düşük hacimlerde elde edilebildiği veya mümkün olduğunca az miktardaki vücut sıvılarından pek çok ölçümün gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bu açıdan değerlendirildiğinde küçük boyutlu elektrotların kullanımı önem arz etmektedir. Mikro boyutlu elektrotlar ile çözelti ortamında elektrokimyasal tepkimelerde açığa çıkan çok küçük akım miktarlarını ölçülebilmesi imkân bulunmaktadır. Pikoamperler seviyelerinde bile sinyallerin ölçülebildiği görülmektedir [45-46]. Böylece biyolojik ve tıbbi öneme sahip moleküllerin elektrokimyasal olarak incelenmesi, çok düşük derişimlerinin hassas bir şekilde tayini mümkün hale gelmektedir. Bu şekilde minyatürize edilmiş ve çoklu ölçümlerin gerçekleştirebildiği sistemler geliştirilmiştir [47-48].

### 1.4. FDM (Kaynaştırma Biriktirme Modellemesi)

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing) veya daha bilinen adıyla Üç Boyutlu Yazma (3D Printing), malzemelerin katmanlar halinde üst üste eklenerek üretim yapılmasına imkân tanıyan bir teknolojidir. Geleneksel üretim yöntemlerinde (torna, freze vb.) yapılan üretimler stok halindeki bir hammadde üzerinden parçaların kesilip çıkarılmasıyla gerçekleştirilirken 3D yazma ile dijital bir 3 boyutlu model bilgisi yardımıyla hammadde üst üste eklenerek üretilebilir. 3D yazma geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilemeyecek karmaşık tasarımların üretilmesini mümkün kılar. Üretim teknolojileri açısından düşünüldüğünde 3D yazıcılar dünya genelinde pek çok alana önemli yenilikler getir hale gelmiştir. Çeşitli üretim teknolojilerini kullanan pek çok 3D yazıcıyı ticari olarak temin etmek mümkündür. 3D yazıcılar içinde en yaygın kullanılanları Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Deposition (DMD), Stereolithography (STL) ve Fused Deposition Modelling (FDM) teknolojilerine sahip olanlardır [49]. 3D yazıcıların teknolojileri farklı olsa da üretim sürecinde temelde tümü aynı süreçleri kullanır. Aralarında iki temel fark bulunmaktadır. Bunlar; katmanların oluşturulmasında kullanılan teknoloji ve kullanılan hammaddelerdeki çeşitliliğidir. Bu belirtilenler haricinde kalan üretim süreci ve bu

sürece ait temel yaklaşımlar aynıdır. Tümünde ortak olan yaklaşım, üretilecek nesnenin bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design) programları kullanılarak üç boyutlu dijital modelinin elde edilmesidir. Sonrasında üç boyutlu model STL formatına dönüştürülür. Oluşturulan STL dosyasından dilimleme yazılımları kullanılarak katmanlara ayırma yapılır. Her bir katmana ait geometrik veriler GCode dosyası ile 3D yazıcıya aktarıldıktan sonra üretime geçilir. İlk çıktıklarından bu yana 3D yazıcı teknolojileri artan bir ivmeyle gelişmelerini sürdürmüştür. Hem ticari hem de RepRap gibi açık kaynaklı projelerin kullanımıyla FDM üretim süreci sürekli iyileştirilebilmektedir [50].

FDM, masaüstü 3D baskıda kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu teknoloji ile termoplastik bir filament ısıtılır ve eritilmiş plastik malzemeyi X ve Y koordinatlarında hareket ettiren bir ekstrüzyon kafası içinden haddelenir, tabla ise nesne katmanını Z yönünde aşağıya doğru hareket ettirir [51]. Parça, etkin bir şekilde aşağıdan yukarıya inşa edilmiş olur. Ancak, bir nesnenin çıkıntı parçaları varsa, yazdırma bittikten sonra ana parçadan ayrılabilen destek yapılarına ihtiyaç duyacaktır. Bu tür 3D yazıcılar, sağlam parçaları güvenilir ve hızlı bir şekilde üretebildikleri için küçük işletme ve eğitim sektörlerinde ürün geliştirme ve hızlı prototipleme için uygun maliyetli araçlardır.

## 2. MATERYAL ve METOD

### 2.1. Kimyasal Maddeler, Reaktifler ve Elektrotlar

Bu çalışmada kullanılan kimyasallar Sigma-Aldrich ve Merck firmalarından analitik saflıkta temin edilmiş olup herhangi bir saflaştırmaya tabi tutulmadan kullanılmışlardır. Elektrokimyasal ölçümlerde kullanılan elektrolit çözeltileri 18,2 MΩ dirence sahip deiyonize su ile hazırlanmıştır. 3D yazıcılarla üretilen yüzey baskılı elektrot (SPE) benzeri sistemde çalışma, karşıt veya referans elektrot olarak kullanılan kurşun kalem uçları (0,9 mm çaplı, 2B, Mikro marka) kırtasiyelerden satın alınmıştır. Klasik üç elektrotlu elektrokimyasal hücrelerde yapılan ölçümlerde kullanılan referans elektrot Ag/AgCl (3 M KCl), karşıt elektrot olarak ise Pt teldir (Aldrich % 99,9).

### 2.2. FDM Tipi 3D Yazıcıyla Yüzey Baskılı Elektrot Benzeri Elektrotların Üretilmesi

FDM 3D yazıcılar ile yapılan üretimler sırasında birçok parametrenin ayarlanması gerekir. Bu parametreler üretilen akış hücresinin kalitesini doğrudan etkiler. FDM 3D yazıcıda üretim yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir.

3D yazıcı kullanılarak üretilen yüzey baskılı elektrot benzeri elektrotlar Şekil 3'te görülmektedir. Üretilen bu elektrotlar parasetamolün elektrokimyasal yükseltgenmesinde test edilmişlerdir. Klasik üç elektrotlu sistem ile performansları karşılaştırmalı olarak çalışılmıştır. Burada temel amaç aynı yüzey baskılı elektrot sisteminde olduğu gibi hem elektrokimyasal ölçümlerin küçük bir hacimde gerçekleştirilmesi hem de çalışma, karşıt ve referans elektrodun elektrokimyasal ölçümün gerçekleşeceği küçük hacimde yer alacağı şekilde tasarlamak olmuştur. Bu şekilde hem araştırma amaçlı hem de eğitim amaçlı deneylerde kullanılacak bir sistem geliştirilmesi hedeflenmiştir.

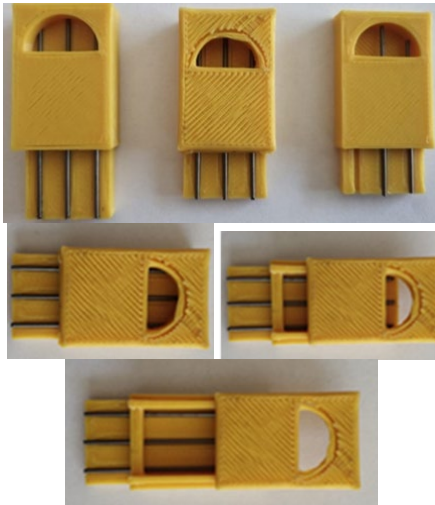
Çizelge 1. FMD tipi 3D Yazıcı ile Üretim Parametreleri.

Parametre	Değer/Özellik
Filament malzemesi	PLA (poli laktik asit)
Katman Kalınlığı (Layer Height)	0,2 mm
Katman Genişliği (Layer Width)	0,38 mm
Doluluk Oranı (Infill Density, %)	100
Nozzle Çapı (Nozzle Diameter)	0,4 mm
Nozzle Temperature (°C)	210
Baskılama Hızı (Printing Speed)	20 mm/s
Non-Print Speed (mm/s)	40 mm/s
Yatay Kabuk Sayısı (Horizontal Shells)	5
Dikey Kabuk Sayısı (Vertical Shells)	5
Baskı Tablası Sıcaklığı (Build Table Temperature)	22 ± 1 (°C)

Şekil 4'te gösterilen klasik üç elektrotlu elektrokimyasal sistemde referans olarak Ag/AgCl veya kalomel kullanılırken, karşıt elektrot olarak genellikle Pt tel veya levha



kullanılmaktadır. Çalışma elektrodu olarak ise yapılacak çalışmaya bağlı olarak çıplak elektrotlar veya modifiye elektrotlar tercih edilmektedir. Hem Pt hem de referans elektrotların maliyeti ve kullanımdaki diğer hususlar düşünüldüğünde farklı alternatiflerin de kullanıldığı görülmektedir. Pseudo referans elektrot işlevi görecektir Ag/AgCl temelli referans elektrotların 3D yazıcılarla üretilebilmesi mümkündür [52]. Bazı çalışmalarda hem referans hem de karşıt elektrot olarak karbon kökenli elektrotlar kullanılmıştır [53]. Biyolojik öneme sahip bileşiklerin elektrokimyasal tayinlerinde karbon kökenli elektrotların modifikasyonu da yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla yüzey baskılı elektrot benzeri elektrotlarda karbon kökenli elektrotlardan olan kurşun kalem ucu elektrot (KUE) tercih edilmiştir. Kullanılan KUE'ların konumlandırılması Şekil 3'teki yüzey baskılı elektrot benzeri sistemlerde görülmektedir. Böylelikle hem etkin bir şekilde kullanılabilir bir elektrot türü seçilmiş hem de çalışma, karşıt ve referans elektrot olarak tercih edilerek maliyet en az düzeye indirilmiştir. Klasik üç elektrotlu elektrokimyasal hücrelerle yapılan karşılaştırmalı çalışmalar ile sistemin kullanılabilirliği test edilmiştir. KUE son yıllarda sensör ve biyosensör çalışmalarında etkin olarak kullanılmaktadır [35, 37, 54]. Hem yaygın olarak bulunabilmesi hem de tek kullanımlık ve ucuza mal olması gibi avantajlarının bulunması diğer üstün yönleridir. Bu çalışmada ise KUE'nin 3D yazıcılarla üretilmiş elektrot platformunda kullanımının da mümkün olduğu gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Üç boyutlu yazıcı ile yüzey baskılı elektrot benzeri üretilen prototip elektrotlar.

### 2.3. 3D Yazıcıyla Üretilen Yüzey Baskılı Elektrot Benzeri Elektrotların Elektrokimyasal Performansı

3D yazıcı kullanılarak üretilen yüzey baskılı elektrot benzeri elektrotta çalışma, referans ve karşıt olarak KUE'un kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu sayede kolaylıkla kırtasiyelerden satın alınabilecek KUE'ların bu sisteme entegre edilebilmesinin mümkün olup olmadığı incelenmiştir. Bu amaca yönelik olarak klasik üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede ve FDM tipi 3D yazıcıyla üretilen elektrot sisteminde, 4,0 mM parasetamol içeren pH 7,0 fosfat tamponu (FT) ortamında dönüşümlü voltametrik ölçümler alınmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4 klasik üç elektrotlu elektrokimyasal hücre konfigürasyonunu göstermektedir. Klasik üç elektrotlu çalışmalarda referans elektrot olarak Ag/AgCl, karşıt elektrot olarak Pt tel kullanılmaktadır. Çalışma elektrodu olarak ise Pt, Au gibi metaller veya karbon kökenli elektrotlar kullanılabilir. Bu çalışmada çalışma elektrodu olarak KUE (0,9 mm çap, 2B, Mikro) kullanılmıştır. Öncelikle klasik sistemde maliyeti yüksek olan referans ve Pt karşıt elektrot yerine KUE kullanıldığında PS için elde edilen voltamogramlardaki yükseltgenme piki gerilimlerin değişimi dönüşümlü voltametri yöntemi ile belirlenmiştir.



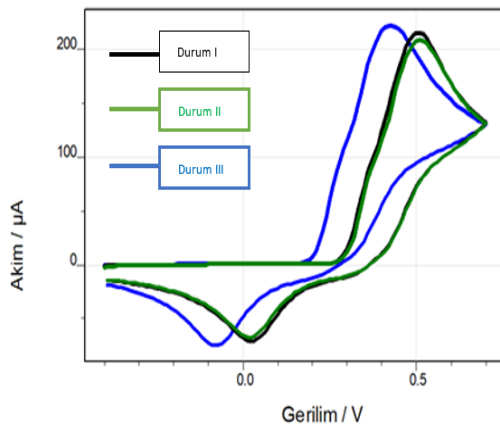
**Şekil 4.** Referans elektrot olarak Ag/AgCl (3M KCl), karşıt elektrot olarak Pt tel ve çalışma elektrodu olarak KUE'un kullanıldığı üç elektrotlu klasik bir sistem.

Şekil 5'te elektrotların üç farklı durumu için parasetamolün yükseltgenmesine ait voltamogramları görülmektedir. Çalışma elektrodu (ÇE), referans elektrot (RE) ve karşıt

elektrot (KE) için bu üç farklı durum aşağıdaki gibidir.

- I) ÇE=KUE, RE=Ag/AgCl, KE= Pt tel  
 II) ÇE = KUE, RE = Ag/AgCl, KE= KUE  
 III) ÇE = KUE, RE = KUE, KE= KUE

Şekil 5'teki voltamogramlar incelendiğinde I ve II durumu için 0,50 V'ta (sırasıyla 215  $\mu$ A ve 208  $\mu$ A) III durumu için 0,43 V'ta (222  $\mu$ A) parasetamol ait belirgin bir yükseltgenme piki gözlenmiştir. Bu voltamogramlarda çözeltideki parasetamol derişimine bağlı olarak elde edilen yükseltgenme pik akımı değerleri görülmektedir. Bu akım değeri çözeltideki parasetamolün derişimi ile orantılıdır. Karşit elektrot olarak Pt değil de KUE kullanıldığında (II durumu) pik gerilim değeri değişmemiştir ve KUE'un karşit elektrot olarak kullanılabilceğı anlaşılmıştır. Referans elektrot olarak Ag/AgCl (3 M KCl) yerine KUE'un kullanıldığı ve çalışma ve karşit elektrodun da KUE olduğu durumda (III durumu) referans elektrodun değışmesi nedeniyle pik gerilimi 70 mV kadar düşük gerilim değerine kaymıştır. Bununla beraber elde edilen akım değeri ve voltamogram davranışı parasetamolün yükseltgenmesini belirlemek için uygundur. Literatürde referans ve karşit elektrot olarak karbon kökenli elektrotların kullanımına rastlanmaktadır [53, 55].



Şekil 5. 3D yazıcı ile üretilen yüzey baskılı elektrot benzeri sistemde 4,0 mM parasetamol içeren pH 7,0 FT'unda üç farklı elektrot konfigrasyonunda (Durum I,II ve III) elde edilen dönüşümlü voltamogramlar.

Üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede çalışma, referans ve karşit elektrot olarak KUE'un kullanılabilceğinin anlaşılması 3D yazıcılar ile

üretilmiş elektrotlarda tüm elektrotları KUE olarak tasarlayabileceğimizi gösterdiğinden maliyetin oldukça düşürülmesi ve tasarımın kolaylaşması mümkün olmuştur. Aksi takdirde özellikle referans elektrot olarak Ag/AgCl veya psödo Ag referans elektroda ihtiyaç olacağından tek kullanımlık bir elektrot üretiminde maliyet artacak ve üretim süreci zorlaşacaktır.

Şekil 6'da görülen tasarımda ise üç ayrı kanaldan takıp çıkarılabilen elektrotların hepsi uç kısımda ortak hacimde yer alırlar ve analit çözeltisi üç elektroda da temas edecek şekilde bu kısma eklenir. 0,5 mL'yi geçmeyecek bir analit hacmi yeterli gelmektedir. Bir mikropipet kullanılarak her defasında analit çözeltisinin yenilenmesi sağlanmaktadır. Çalışma elektrodu olarak kullanılacak KUE her defasında rahatlıkla takıp çıkarılabilmekte ve kullanılmamış bir elektrot yüzeyi elde edilebilmektedir. Hatta KUE'un elektrodun kullanılmayan diğer kısmı ikinci ve yeni bir elektrot olarak kullanılabilmektedir. Bu durumda ticari elektrotlardaki gibi tek kullanımdan sonra elektrodun atılmasına gerek kalmamakta ve yeni bir çalışma elektrodu yüzeyi KUE'un yenilenmesi ile sağlanabilmektedir. Değıştirilen kısım sadece çalışma elektrodu olarak kullanılan kalem ucu olacaktır. Parasetamol gibi bir analitin elektrokimyasal yükseltgenmesi çalışma elektrodu yüzeyinde gerçekleştiğı için numune çözeltisi içinde yükseltgenme ürünlerinden kaynaklı kirlilik miktarı minimum düzeyde kalacaktır. Ölçüm yapılan bu numunenin ölçüm bittikten sonra dökülüp, numune konulan kısmın 1-2 defa saf su ile yıkanması ve yeni bir ölçüme için hazır hale gelmesi kolayca gerçekleşebilir. Bunun haricinde daha küçük boyutlarda ve daha küçük çaplı elektrotların kullanılabilceğı benzer sistemlerin üretimi sayesinde maliyet daha da azaltabilir ve bu durumda çoklu kullanımlardan sonra oluşabilecek muhtemel kirlilik durumlarında sistemin yenilenmesi mümkündür. Sistemde referans ve karşit elektrot olarak karbon temelli kalem uçlarının kullanılabilmesi tek maliyeti oldukça düşürdüğünden tek kullanımlık sistemlerde bile alternatif olarak kullanılabilcek bir elektrokimyasal çalışma sistemi elde edilebilmektedir.

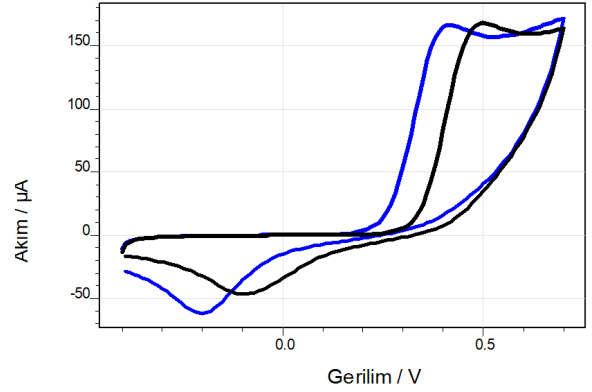


**Şekil 6.** 3D yazıcıyla üretilmiş elektrot sisteminde bütün elektrotların KUE olduğu durum (üstte) ve referans elektrodun Ag/AgCl(3 M KCl) diğerlerinin KUE olduğu durum (altta).

Şekil 7’de 3D yazıcıyla üretilmiş elektrot sisteminde II ve III durumu için elde edilmiş voltamogramlar görülmektedir. Şekil incelendiğinde II durumu için 0,50 V’ta III durumu için ise 0,43 V gerilim değerinde belirgin bir yükseltgenme piki gözlenmiştir. Sonuçlar üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede elde edilenler (Şekil 4) ile uyumludur. Bu sonuçlar proje kapsamında üretilen elektrot sisteminin ve bu sistemde KUE kullanımının başarılı olduğunu göstermektedir. Tasarımın daha da geliştirilmesi mümkündür. Sistemin özellikle çapı 0,7 veya 0,5 mm olan KUE’ler için adapte edilmesi de mümkündür. Bunun için çok daha küçük boyutlarda üretim yapabilecek daha hassas 3D yazıcıların kullanılması gerekecektir.

Bunun dışında Şekil 6’daki yüzey baskılı elektrot benzeri sistemlerin belli oranda gözenekliliğe sahip olması nedeniyle gözeneklerden çözelti sızabildiği belirlenmiştir. Bunun önlenmesi için piyasada japon yapıştırıcısı olarak bilinen siyano akrilat temelli yapıştırıcıların bir kaç kez uygulanmasıyla gözenekler kapatılabilmektedir. Bir diğer alternatif ise mümkün olduğunca gözenek olmayacak şekilde üretim parametrelerinin

ayarlanması ve/veya daha hassas üretim yapabilen gelişmiş 3D yazıcıların kullanılmasıdır.



**Şekil 7.** Şekil 6’daki 3D yazıcı ile üretilmiş elektrotlar ile 4,0 mM parasetamol içeren pH 7,0 FT’unda iki farklı elektrot konfigürasyonunda elde edilen dönüşümlü voltamogramlar. (Siyah: ÇE=KUE, RE=Ag/AgCl(3M KCl), KE:KUE ve Mavi: ÇE=KUE, RE=KUE, KE:KUE)

### 3. SONUÇ

FDM tipi üç boyutlu yazıcılar kullanılarak yüzey baskılı elektrotlara (screen printed electrode, SPE) benzeyen sistemler üretilmiştir. Ticari olarak satın alınan yüzey baskılı elektrotlar psödo bir referans elektrottan ve karbon temelli bir karşıt elektrot ile uygun bir çalışma elektrodundan oluşmaktadır. Referans elektro ve çalışma elektrodu bu elektrotların maliyetine katkı yapan önemli etkenlerdir. Özellikle tek kullanımlık olduklarında maliyetin daha da artacağı gözükmemektedir. Bu nedenle yüzey baskılı elektrot benzeri bir elektrot tasarlarken aynı zamanda son yıllarda yaygın olarak kullanım alanı bulan kalem ucu elektrotların da SPE sistemine adapte edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda 3D yazıcı ile üretilen ve yüzey baskılı elektrotlara alternatif olabilecek elektrotlarımızda çalışma, referans ve karşıt elektrot olarak kurşun kalem ucu elektrot (KUE) kullanılabileceği dönüşümlü voltametri yöntemi ile gösterilmiştir. Dönüşümlü voltametri çalışmalarında biyolojik önemi olan ve biyosensör çalışmalarında da kullanılan ilaç aktif bir madde olan parasetamol tercih edilmiştir. Elektrokimyasal ölçümler 4,0 mM parasetamol içeren pH 7 değerindeki fosfat tamponunda gerçekleştirilmiştir. Klasik üç elektrotlu elektrokimyasal sistemde ve 3D yazıcı ile üretilmiş elektrot sisteminde karşılaştırmalı olarak yapılan çalışmalar KUE’un hem klasik üç elektrotlu sistemde hem de 3D yazıcı ile üretilen elektrotlarda başarılı

bir şekilde kullanılabilmesini göstermiştir. Literatürde KUE ve üç boyutlu yazıcılar ile ilişkili sınırlı sayıda çalışmalardan birinde, Ag nanoparçacıklar ile modifiye edilmiş KUE'lar (2B, 2mm) 3D baskılı mikroakışkan platformda hidrojen peroksitin elektrokimyasal olarak tayininde kullanılmıştır [56].

Bu sonuçlar 3D yazıcılar ve KUE kullanılarak ticari olarak üretilen elektrotlara göre daha düşük maliyetle üretim yapılabilmesini göstermiştir. Ayrıca üç boyutlu yazıcı ile üretilen yüzey baskılı elektrot benzeri sistemimizde KUE'ların istenildiğinde takıp çıkarılabilmesi önemli bir avantajdır. Yazıcı ile üretilen sistemin tek kullanımının ardından atılmasının önüne geçilmiş ve sadece çalışma elektrodunun yenilenmesiyle tekrar kullanılması mümkün olmuştur. Gerekirse gün aşırı veya istenilen zaman aralıklarında referans ve karşıt elektrot olarak kullanılan KUE ta değiştirilebilir. Bu çalışma, elektrokimyasal sensör/biyosensör çalışmalarında kullanılan elektrotların veya sistemlerin, ulaşılması ve kullanımı kolay olan üç boyutlu yazıcılarla düşük maliyetle üretilebileceğini göstermektedir. Karbon temelli çalışma elektrodu içeren ticari bir yüzey baskılı elektrot ile kıyaslandığında önerdiğimiz yüzey baskılı elektrot benzeri sistemde değişen sadece çalışma elektrodu olarak kullanılan KUE'un kendisi olacaktır ve bu bağlamda sistemin ticari olanlara kıyasla yaklaşık onda bir oranında maliyeti azaltacağı öngörülmektedir. Aynı zamanda hem araştırma hem de eğitim amaçlı çalışmalarda kullanılacak bir sistem üretilmiştir. KUE gibi kırtasiyelerden kolaylıkla temin edilen karbon temelli elektrotların kullanımıyla maliyetlerin daha da düşürülmesinin mümkün olduğu da gösterilmiştir.

## TEŞEKKÜR

17.MÜH.16 nolu proje ile bu çalışmayı destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

1. Bahadır, E.B. and Sezgintürk, M.K., "Applications of commercial biosensors in clinical, food, environmental, and biothreat/biowarfare analyses", *Analytical Biochemistry*, Vol. 478, Pages 107-120, 2015.

2. Kurbanoğlu, S., Özkan, S.A. and Merkoçi, A., "Nanomaterials-based enzyme electrochemical biosensors operating through inhibition for biosensing applications", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 89, Pages 886–898, 2017.

3. Akbari-Javar, H., Garkani-Nejad, Z., Dehghannoudeh, G. and Mahmoudi-Moghaddam, H., "Development of a new electrochemical DNA biosensor based on Eu<sup>3+</sup>-doped NiO for determination of amsacrine as an anti-cancer drug: Electrochemical, spectroscopic and docking studies", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 1133, Pages 48-57, 2020.

4. Narita, F., Wang, Z., Kurita, H., Li, Z., Shi, Y., Jia, Y. and Soutis, C.A., "Review of piezoelectric and magnetostrictive biosensor materials for detection of COVID-19 and other viruses", *Advanced Materials*, Vol.33, Issue 1, Article number 2005448, 2021.

5. Ramanathan, K. and Danielsson, B., "Principles and applications of thermal biosensors", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 16, Issue 6, Pages 417-423, 2001.

6. Seo, G., Lee, G., Kim, M.J. Baek, S.-H., Choi, M., Ku, K.B., Lee, C.-S., Jun, S., Park, D., Kim, H.G., Kim, S.-J. and Lee, J.-O., "Rapid detection of COVID-19 causative virus (SARS-CoV-2) in human nasopharyngeal swab specimens using field-effect transistor-based biosensor", *ACS Nano*, Vol. 14, Issue 4, Pages 5135-5142, 2020.

7. Madurai, G., Sasidharan, M. and Ganesan, V., "Electrochemical sensor and biosensor platforms based on advanced nanomaterials for biological and biomedical applications", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 103, Pages 113-129, 2018.

8. Arduini, F., Micheli, L., Moscone, D., Moscone D., Palleschi, G., Piermarini, S., Ricci, F. and Volpe, G., "Electrochemical biosensors based on nanomodified screen-printed electrodes: Recent applications in clinical analysis", *TrAC-Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 79, Pages 114-126, 2016.

9. Pingarrón, J.M., Yáñez-Sedeño, P. and González-Cortés, A., "Gold nanoparticle-based electrochemical biosensors", *Electrochimica Acta*, Vol. 53, Issue 19, Pages 5848-58661, 2008.

10. Kannappan, S., Prabakaran, L., Nesakumar, N., Babu, K.J., Kulandaisamy, A.J. and Rayappan, A.B.B., "Design and development of a non-enzymatic electrochemical biosensor for the detection of glutathione", *Electroanalysis*, Vol. 35, Issue 1, e202100650, 2023.

11. Kour, R., Arya, S., Young, S.-J., Gupta, V., Bandhoria, P. and Khosla, A., "Recent advances in carbon nanomaterials as electrochemical biosensors", *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 167, Issue 32020, Article number 037555, 2020.
12. Lin, Y., Lin Y., Lu, F. and Wang, J., "Disposable carbon nanotube modified screen-printed biosensor for amperometric detection of organophosphorus pesticides and nerve agents", *Electroanalysis*, Vol. 16, Issue 1-2, Pages 145-149, 2004.
13. Palenzuela, C.L.M. and Pumera, M., "(Bio)Analytical chemistry enabled by 3D printing: Sensors and biosensors", *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 103, Pages 110-118, 2018.
14. Marzo, A.M.L., Mayorga-Martinez, C.C. and Pumera, M., "3D-printed graphene direct electron transfer enzyme biosensor", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 1511, Article number 111980, 2020.
15. Elbadawi, M., Ong, J.J., Pollard, T.D., Gaisford, S. and Basit, A.W., "Additive manufacturable materials for electrochemical biosensor electrodes", *Advanced Functional Materials*, Vol. 31, Article number 2006407, 2021.
16. Bonyár, A., Sántha, H., Ring, B., Varga, M., Kovács, J. G. and Harsányi, G., "3D rapid prototyping technology (RPT) as a powerful tool in microfluidic development", *Procedia Engineering*, Vol. 5, 291-294, 2010.
17. Roda, A., Guardigli, M., Calabria, D., Calabretta, M. M., Cevenini, L. and Michelini, E., "A 3D-printed device for a smartphone-based chemiluminescence biosensor for lactate in oral fluid and sweat", *Analyst*, Vol. 139, Issue 24, Pages 6494-6501, 2014.
18. Gowers, S. A., Curto, V. F., Seneci, C. A., Wang, C., Anastasova, S., Vadgama, P., Yang, G.-Z. and Boutelle, M. G. , "3D printed microfluidic device with integrated biosensors for online analysis of subcutaneous human microdialysate". *Analytical Chemistry*, Vol. 87, Issue 15, Pages 7763-7770, 2015.
19. Dias, A. A., Cardoso, T. M., Cardoso, R. M., Duarte, L. C., Muñoz, R. A., Richter, E. M. and Coltro, W. K., "Paper-based enzymatic reactors for batch injection analysis of glucose on 3D printed cell coupled with amperometric detection", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 226, Pages 196-203, 2016.
20. Annu, Sharma, S. Jain, R. and Antony Nitin Raja A.N. "Review—Pencil Graphite Electrode: An Emerging Sensing Material", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 167 Article number 037501, 2020.
21. Pishko, M. V., Katakis I., Lindquist S.E., Heller, A. and Degani Y. "Electrical Communication Between Graphite Electrodes and Glucose Oxidase/Redox Polymer Complexes", *Molecular Crystals and Liquid Crystals Incorporating Nonlinear Optics*, Vol. 190, Issue 1, Pages 221-249, 1990.
22. Ishida, N. and Saito, K., "Pencil lead and manufacturing method of the same. US Patent, No 4017451, 1977.
23. Down, M.P. Foster, C.W. Ji, X. and Banks, C.E., "Pencil drawn paper based supercapacitors", *RSC Advances*, Vol. 6, Issue 84, Pages 81130-81141, 2016.
24. Tavares, P.H.C.P., Barbeira, P.J.S., "Influence of pencil lead hardness on voltammetric response of graphite reinforcement carbon electrodes". *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 38, Pages 827-832, 2008.
25. Torrinha, A., Amorim, C.G., Montenegro, M.C.B.S.M. and Araújo, A.N., "Biosensing based on pencil graphite electrodes", *Talanta*, Vol. 190, Issue 1, Pages 235-247, 2018.
26. Foster, C.H., Brownson, D.A.C., Ruas de Souza, A.P., Bernalte, E., Iniesta, J., Bertotti, M. and Banks, C.E., "Pencil it in: pencil drawn electrochemical sensing platforms", *Analyst*, Vol. 141, Pages 4055-4064, 2016.
27. Navratil. R., Kotzianova, A., Halouzka, V., Opletal, T., Triskova, I., Trnkova, L. And Hrbac, J., "Polymer lead pencil graphite as electrode material: Voltammetric, XPS and Raman study", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 783, Issue15, Pages 152-160, 2016.
28. Kariuki, J.K., "An Electrochemical and Spectroscopic Characterization of Pencil Graphite Electrodes" *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 159, Issue 9, H747, 2012.
29. Masawat, P., Liawruangrath, S., Vaneesorn, Y. and Liawruangrath, B., "Design and fabrication of a low-cost flow-through cell for the determination of acetaminophen in pharmaceutical formulations by

flow injection cyclic voltammetry”, *Talanta*, Vol. 58, Issue 6, Pages 1221-1234, 2002.

30. Buratti, S., Scampicchio, M., Giovanelli, G. and Mannino, S., “A low-cost and low-tech electrochemical flow system for the evaluation of total phenolic content and antioxidant power of tea infusions”, *Talanta*, Vol. 75, Issue 1, Pages 312-316, 2008.

31. Ozge, K., Hurmus, G., Semih, G. and Sahin, Y., “Highly sensitive electrochemical determination of dopamine with an overoxidized polypyrrole nanofiber pencil graphite electrode”, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 12, Issue 7, Pages 6428-644, 2017.

32. Özbek, A. and Özcan, L. “Voltammetric performance of nanofiber structured over-oxidized poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) modified pencil graphite electrodes for dobutamine sensing”, *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, Vol. 11, Issue 1, pages 55-70, 2024.

33. Ayaz, S., Karakaya, S., Emir, G., Uşaklıgil, N., Giray Dilgin, D., Dilgin, Y., “Flow-Injection Amperometric Determination of Glucose Using Nickel Oxide-Cobalt (II,III) Oxide and Nickel Oxide-Copper Nanoparticle Modified Pencil Graphite Electrodes”, *Analytical Letters*, Vol. 55, Issue 13, Pages 2046 – 2057, 2022.

34. Yazar, S., Arvas, M.B., Polat, B. aOzeroglu, C., “Green Synthesis of Copper Oxide Nanoparticle Decorated Polypyrrole-Chitosan on Pencil Graphite Electrode for Enzyme-Free Glucose Sensors”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, Vol. 12, Issue 7, Article number 077002, 2023.

35. Özcan, L., Altuntas, M., Büyüksağış, A., Türk H. and Yurdakal, S., “Electrochemical determination of bisphenol A with pencil graphite electrodes modified with Co(II), Ni(II), Cu(II) and Fe(II) phthalocyaninetetrasulfonates”, *Analytical Sciences*, Vol. 32, Issue 8, Pages 881-886, 2016.

36. Dilgin, D.G., Ertek, B. And Dilgin, Y., “A low-cost, fast, disposable and sensitive biosensor study: flow injection analysis of glucose at poly-methylene blue-modified pencil graphite electrode” *Journal of the Iranian Chemical Society*, Vol. 15, Issue 6, Pages 1355 – 13631, 2018.

37. Özcan L., Cu(II), Ni(II), Co(II) ve Fe(II) “Metaloftalosiyantetrasülfonat Modifiye Kalem Ucu Elektrotlar ile Elektrokimyasal Dopamin

Tayini”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 19, Sayı 2, Sayfa 291-300, 2019.

38. Lakhera P., Chaudhary V., Jha A., Singh R., Kush P., Kush P. and Kumar P., “Recent developments and fabrication of the different electrochemical biosensors based on modified screen printed and glassy carbon electrodes for the early diagnosis of diverse breast cancer biomarkers”, *Materials Today Chemistry*, Vol. 26, Article Number 101129, 2022.

39. Taleat, Z., Khoshroo, A. and Mazloun-Ardakani, M., “Screen-printed electrodes for biosensing: A review (2008-2013)”, *Microchim. Acta*. Vol. 181, Pages 865–89, 2014.

40. Taufiq, S., Waqar, M., Sharif, M.N. and Abbas, S.R., “Towards portable rapid TB biosensor: detecting mycobacterium tuberculosis in raw sputum samples using functionalized screen printed electrodes”, *Bioelectrochemistry*, Vol. 150, Article number 108353, 2023.

41. Scognamiglio, V. Pezzotti, I., Pezzotti, G., Cano, J., Manfredonia, I., Buonasera, K., Rodio, G. and Giardi, M.T. “A new embedded biosensor platform based on micro-electrodes array (MEA) technology”, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, Vol. 176, Pages 275-283, 2013.

42. Juska, V.B. and Pemble, M., “A dual-enzyme, micro-band array biosensor based on the electrodeposition of carbon nanotubes embedded in chitosan and nanostructured Au-foams on microfabricated gold band electrodes”, *Analyst*, Vol. 145, Issue 2, Pages 402-414, 2020.

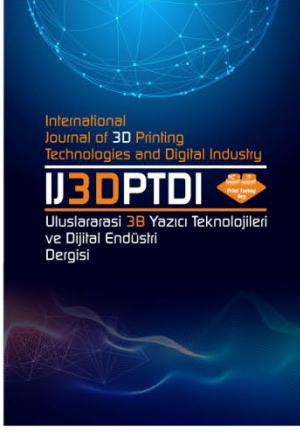
43. “Screen-printed electrodes” [https://www.dropsens.com/en/screen\\_printed\\_electrodes\\_pag.html](https://www.dropsens.com/en/screen_printed_electrodes_pag.html), Temmuz 17, 2023.

44. Mistry, K.K., Layek, K., Mahapatra, A., RoyChaudhurib, C. and Saha, H., “A review on amperometric-type immunosensors based on screen-printed electrodes”, *Analyst*, Vol. 139, Pages 2289-2311, 2014.

45. Cano, J.B., Buonasera, K. and Pezzotti, G., “Transduction methods used on biosensors: amperometry and fluorescence”, *Revista Facultad de Ingenieria de Antioquia*, Vol. 72, Pages 104–115, 2014.

46. Rackus, D.G., Shamsi, M.H. and Wheeler, A.R., “Electrochemistry, biosensors and microfluidics: a convergence of fields”, *Chemical Society Review*, Vol. 44, Pages 5320–5340, 2015.

47. Neves, M.M.P.S., González-García, M.B., Hernández-Santos, D. and Fanjul-Bolado, P., "Screen-Printed electrochemical 96-well plate: A high-throughput platform for multiple analytical applications", *Electroanalysis*, Vol. 26, Issue 12, Pages 2764-2772, 2014.
48. Tseng, H.-Y., Lizama, J.H., Shen, Y.-W. and Chen, C.-J., "The pursuit of further miniaturization of screen printed micro paper-based analytical devices utilizing controlled penetration towards optimized channel patterning", *Scientific Reports*, Vol. 11, Issue 1, Article number 21496, 2021.
49. Berman, B., "3-D printing: The new industrial revolution". *Business Horizons*, Vol 55, Issue 2, 155-162, 2012.
50. Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Irvani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A., "RepRap-the replicating rapid prototyper". *Robotica*, Vol. 29, Issue 01, Pages 177-191, 2011.
51. Bilton, N., "Shapeways, having printed 1 million objects, secures more financing", *The New York Times*, 2012.
52. Rohaizada, N., Mayorga-Martinez, C.C., Novotny, F., Webster, R.D. and Pumera, M. 2019, "3D-printed Ag/AgCl pseudo-reference electrodes", *Electrochemistry Communications*, Vol. 103, Pages 104-108, 2019.
53. Glavan, A.C., Christodouleas, D.C., Mosadegh, B., Yu, H. D., Smith, B.S., Lessing, J., Teresa Fernandez-Abedul, M. and Whitesides, G.M., "Folding analytical devices for electrochemical ELISA in hydrophobic R<sup>H</sup> paper", *Analytical Chemistry*, Vol. 86, Pages 11999–12007, 2014.
54. Torrinha, A., Amorim, C.G., Maria, Montenegro, C.B.S.M. and Araújo, A.N., "Biosensing based on pencil graphite electrodes", *Talanta*, Vol. 190, Issue 1, Pages 235-247, 2018.
55. Katseli, V., Economou, A. and Kokkinos, C., "Single-step fabrication of an integrated 3D-printed device for electrochemical sensing applications", *Electrochemistry Communications*, Vol. 103, Pages 100-103, 2019.
56. Salve, M., Mandal, A., Amreen, K., Pattnaik, P.K. and Goel, S., "Greenly synthesized silver nanoparticles for supercapacitor and electrochemical sensing applications in a 3D printed microfluidic platform", *Microchemical Journal*, Vol. 157, article number 104973, 2020.





ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# ENHANCING MEDICAL OFFICER SCHEDULING IN HEALTHCARE ORGANIZATIONS: A COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF GENETIC AND GOOGLE OR TOOLS ALGORITHMS FOR MULTI-PROJECT RESOURCE-CONSTRAINED OPTIMIZATION

**Yazarlar (Authors):** Osama Burak Elhalid , Ali Hakan Işık 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Elhalid O. B., Işık A. H., “Enhancing Medical Officer Scheduling in Healthcare Organizations: A Comprehensive Investigation Of Genetic And Google Or Tools Algorithms For Multi-Project Resource-Constrained Optimization” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 92-103, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1415512

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>



# ENHANCING MEDICAL OFFICER SCHEDULING IN HEALTHCARE ORGANIZATIONS: A COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF GENETIC AND GOOGLE OR TOOLS ALGORITHMS FOR MULTI-PROJECT RESOURCE-CONSTRAINED OPTIMIZATION

Osama Burak Elhalid<sup>a</sup>, Ali Hakan Işık<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Engineering and Architecture, Computer Engineering Department, Turkey

\* Corresponding Author: [osamaalkhalid9@gmail.com](mailto:osamaalkhalid9@gmail.com)

(Received: 05.01.24; Revised: 17.03.24; Accepted: 04.04.24)

---

## ABSTRACT

In healthcare organizations, medical staff scheduling is vital to achieving optimal patient care, ensuring the well-being of medical officers, and the efficiency of operations. This research aims to address the challenges of optimizing the scheduling of limited resources for multiple projects for medical staff, through a comparative analysis of Google OR tools and genetic algorithms. We evaluate the performance of these tools in various scenarios, taking into account factors such as overtime, work balance, and scheduling efficiency. This comparative analysis reveals the strengths and weaknesses of each approach, facilitating the development of improved medical staff scheduling solutions. Additionally, we offer algorithmic optimizations tailored to meet the requirements of specific healthcare settings, which contribute to enhancing the adaptability and effectiveness of scheduling tools. The research findings provide valuable insights to guide decision-making in healthcare institutions, ultimately aiming to enhance the quality of care provided by medical officers and improve the overall efficiency of the healthcare system. In conclusion, the results show that the modified Google OR algorithm significantly outperforms the Google OR tools and the regular genetic algorithm in performance.

**Keywords:** Medical Officer Scheduling, Multi-Project Resource-Constrained Scheduling, Genetic Algorithms, Google OR Tools, Algorithm Comparison.

---

## 1. INTRODUCTION

The intricate landscape of healthcare demands meticulous multi-project resource-constrained scheduling for its nursing staff. Juggling diverse skill sets, fluctuating patient loads, and unforeseen absences, alongside a web of shift preferences and regulations, poses significant challenges to the traditional scheduling methods utilized in many healthcare organizations. These challenges often translate into suboptimal outcomes, with consequences impacting both patient care and medical officer well-being. Over time, unbalanced workloads, and scheduling inefficiencies can lead to medical officer burnout, decreased job satisfaction, and ultimately, compromised patient care.

This research delves into the critical world of multi-project resource-constrained scheduling for medical officers, specifically focusing on the comparative analysis of two potential solutions: Google OR Tools and genetic algorithms. Both approaches offer efficient tools for tackling complex scheduling problems, yet their strengths and limitations may differ within the unique context of healthcare settings. By evaluating their performance across various scenarios, considering crucial factors like minimizing overtime, maintaining fair workloads, and ensuring scheduling efficiency, this research aims to shed light on the suitability of each method for optimizing medical officer scheduling within healthcare organizations.

Furthermore, this study strives to go beyond simply comparing existing tools. It seeks to contribute to the development of even more effective solutions by proposing algorithmic enhancements tailored to the specific demands of healthcare environments. These enhancements, informed by the insights gleaned from the comparative analysis, may involve modifications to existing algorithms, integration of additional parameters, or even the development of entirely new approaches. Ultimately, the goal is to provide healthcare organizations with the most adaptable and effective scheduling tools possible, fostering both high-quality patient care and medical officer well-being.

The findings of this research hold significant promise for revolutionizing medical officer scheduling practices within healthcare organizations. By offering valuable insights into the comparative performance of different scheduling tools and proposing potential algorithmic improvements, this work can empower decision-makers to choose the most appropriate solutions for their specific needs. Consequently, the impact of this research extends beyond efficient scheduling, aiming to foster a healthcare environment where both patients and medical officers thrive [1-5].

## 2. LITERATURE REVIEW

### 2.1 Multi-Project Resource-Constrained Scheduling and Optimization Techniques:

The problem of multi-project resource-constrained scheduling (MPRCS) has been extensively studied in various fields, including manufacturing, construction, and healthcare. Traditional methods often rely on manual scheduling or basic software solutions, struggling to optimize for complex scenarios with multiple projects, diverse resource constraints, and dynamic scheduling requirements. To address these limitations, researchers have explored various optimization techniques:

- **Constraint Programming:** Constraint programming tools like Google OR Tools offer effective solutions for MPRCS by modeling resource constraints and scheduling rules as mathematical equations. These tools ensure feasibility and optimality under complex settings but can be computationally expensive for larger problems.

- **Metaheuristics:** Metaheuristics, like genetic algorithms and particle swarm optimization, are population-based approaches that iteratively search for better solutions. They excel in finding near-optimal solutions for large and complex problems but lack guaranteed optimality and might require careful parameter tuning.

### 2.2 Google OR Tools and Genetic Algorithms for Scheduling:

- **Google OR Tools:** OR Tools is a powerful constraint programming toolkit widely used for scheduling problems. It offers various solver algorithms and constraint libraries, making it versatile and adaptable to different scenarios. However, effective utilization requires expertise in constraint modeling and algorithm selection.

- **Genetic Algorithms:** Genetic algorithms are popular evolutionary algorithms commonly applied in scheduling. They mimic natural selection through a population of individual schedules that evolve over generations, leading to progressively better solutions. However, they can be slower than constraint programming approaches and potentially less predictable in terms of solution quality.

### 2.3 Gaps and Limitations in Existing Approaches:

Despite significant advancements, several gaps and limitations remain in existing MPRCS optimization techniques:

- **Healthcare-specific Considerations:** Existing research often focuses on generic scheduling scenarios, neglecting the unique demands of healthcare settings. Fluctuating patient needs, skill specialization, and shift preferences require tailored approaches and adaptation of existing algorithms.

- **Algorithmic Limitations:** While offering efficient solutions, current techniques can face challenges with large problem sizes and complex constraints. Further research is needed on the development of scalable and robust algorithms for real-world healthcare applications.

- **Integration with Existing Systems:** Implementing new scheduling tools often requires integration with existing hospital information systems, presenting additional challenges in data compatibility and workflow adaptation [6-14].

### 3. PROBLEM STATEMENT

In healthcare organizations, efficient and effective medical officer scheduling is paramount for ensuring optimal patient care, staff well-being, and operational efficiency. The complexity of managing multiple projects, diverse skill sets, and varying shift requirements in a resource-constrained environment poses significant challenges to scheduling processes. Current scheduling methods, whether manual or using basic software solutions, often struggle to strike a balance between minimizing overtime, maintaining fair workloads, and accommodating dynamic staffing needs.

Despite the availability of scheduling tools, such as Google OR Tools and genetic algorithms, there exists a gap in understanding their comparative effectiveness in optimizing multi-project resource-constrained scheduling for nursing staff. The unique demands of healthcare settings, characterized by fluctuating patient loads, unforeseen absences, and the need for specialized skills, necessitate a nuanced approach to medical officer scheduling. Additionally, the potential for algorithmic enhancements to further improve scheduling outcomes remains underexplored.

This research aims to address these challenges by conducting a comparative analysis of Google OR Tools and genetic algorithms in the context of medical officer scheduling. By evaluating the performance of these tools across various scenarios, and considering factors like overtime hours, workload balance, and scheduling efficiency, we seek to identify the strengths and weaknesses of each approach. Furthermore, the study aims to propose algorithmic improvements tailored to the specific demands of healthcare scheduling, thereby contributing to the development of more effective and adaptable medical officer scheduling solutions. Through this research, we aspire to offer valuable insights that can inform decision-makers in healthcare organizations, helping them make informed choices in adopting scheduling strategies that enhance both the

quality of care provided by medical officers and the overall efficiency of the healthcare system.

## 4. METHODOLOGY

### 4.1 Data Collection

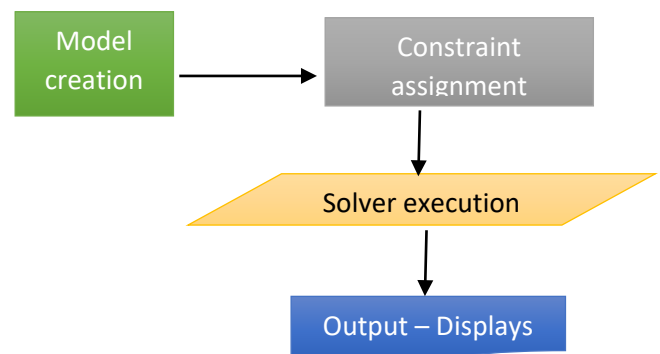
Describe the datasets used for experimentation. Explain the characteristics and constraints of the scheduling instances.

### 4.2 Google OR Tools:

Provide an overview of Google OR Tools. Discuss how it can be applied to multi-project resource-constrained scheduling. Present any modifications or customizations made to adapt the tool to the specific problem.

### 4.3 Genetic Algorithms:

Explain the basic principles of genetic algorithms. Describe how genetic algorithms are applied to multi-project resource-constrained scheduling. Discuss any enhancements or modifications made to the algorithm.



**Figure 1.** Google OR Tools Algorithm.

Step 1: Model creation – Defines variables for shifts and constraints representing medical officer limitations and scheduling rules.

Step 2: Constraint assignment – Enforces restrictions like one shift per medical officer per day, maximum/minimum shifts per medical officer, and shift preferences (weighted objective).

Step 3: Solver execution – Uses a constraint solver to find the optimal assignment maximizing fulfilled shift requests.

Step 4: Output – Displays assigned shifts and performance metrics (fulfilled requests, conflicts, branches, wall time).

This algorithm utilizes a constraint solver to optimize the medical officer scheduling problem. Here's a breakdown of its steps:

**Model Creation:**

Defines variables for each medical officer-day-shift combination (shifts[(n, d, s)]) representing whether a medical officer works a specific shift on a particular day.

**Sets constraints:**

Each shift is assigned to exactly one medical officer per day.

Each medical officer works at most one shift per day.

Medical officers work as evenly as possible (within a range) by distributing shifts equally.

**Objective:**

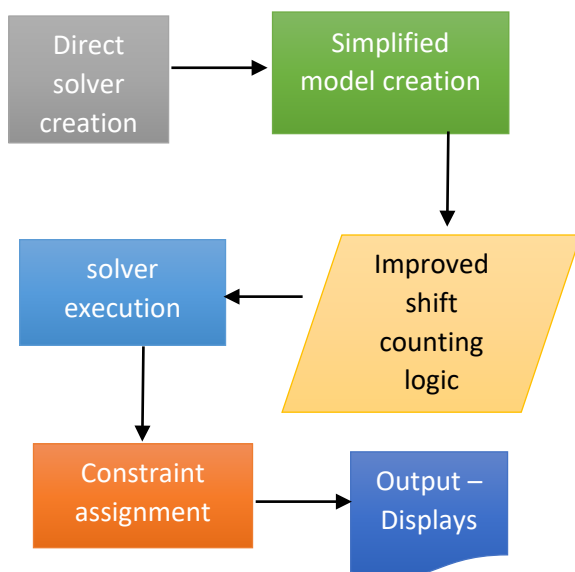
Maximize the total number of fulfilled shift requests using a weighted objective function that considers medical officer preferences.

**Solver:**

Uses a constraint solver like `cp_model.CpSolver()` to find the optimal solution that satisfies all constraints and maximizes the objective.

**Output:**

Prints the assigned shifts for each day, indicating whether they were requested by the medical officer. Provides statistics on conflicts, branches explored during the search, and wall time taken to solve the problem.



**Figure 2.** Improved Google OR Tools Algorithm.

**Improved Google OR Tools**

The Improved Google OR Tools flow diagram is presented below.

Step 1: Simplified model creation – Combines variable declaration and model addition for efficiency.

Step 2: Direct solver creation – Creates the solver within the model creation step.

Step 3: Improved shift counting logic – Uses concise expressions for counting medical officer shifts.

Step 4: Minor formatting changes – Enhances code readability.

Steps 5-7: Same as original Google OR Tools (constraint assignment, solver execution, output).

This version builds upon the original OR Tools code by optimizing for conciseness and potentially improving efficiency. Here are the key changes:

**Simplified Variable Creation:** Combines variable declaration and model addition into a single dictionary comprehension, reducing code lines.

**Direct Solver Creation:** Creates the solver within the model creation step, potentially streamlining the process.

**Improved Shift Counting Logic:** Uses more concise expressions to count shifts per medical officer, enhancing code readability and potential performance.

**Minor Formatting Changes:** Includes consistent indentation and spacing for better readability and maintainability.

**Genetic Algorithm**

The traditional Genetic Algorithm flow diagram is presented below.

Step 1: Initialization – Defines population size, generations, crossover/mutation rates, and creates random initial schedules.

Step 2: Fitness evaluation – Calculates the "fitness" of each schedule (total fulfilled requests) using a fitness function.

Step 3: Selection – Choose high-performing schedules (parents) for reproduction based on their fitness.

Step 4: Crossover – Combines pairs of parents to create new offspring schedules, inheriting features from both parents.

Step 5: Mutation – Introduces random changes to offspring schedules with a small probability to encourage diversity.

Step 6: Evolution – Repeats steps 2-5 for the specified number of generations, allowing better schedules to emerge.

Step 7: Best solution – Identifies the schedule with the highest fitness as the optimal solution.

Step 8: Output – Displays the best schedule and its fitness score.

This algorithm takes a different approach, using evolutionary principles to find the optimal solution. Here's how it works:

#### **Initialization:**

Creates a population of random shift assignments for all medical officers and days.

Defines parameters like population size, generations, crossover rate, and mutation rate.

#### **Fitness Evaluation:**

Calculates the "fitness" of each individual (schedule) based on the total number of fulfilled shift requests.

#### **Selection:**

Select high-performing schedules (parents) for reproduction based on their fitness.

#### **Crossover:**

Combines pairs of parents to create new offspring schedules, inheriting features from both parents.

#### **Mutation:**

Introduces random changes to offspring schedules with a small probability to encourage diversity and exploration.

#### **Evolution:**

Repeats the selection, crossover, and mutation steps for the specified number of generations, allowing better schedules to emerge.

#### **Best Solution:**

Identifies the schedule with the highest fitness as the optimal solution for the medical officer scheduling problem.

#### **Output:**

Displays the best schedule and its fitness score.

### **4.2. Comparison of Google OR Tools, Improved Google OR Tools, and Genetic Algorithm**

Google OR Tools: Efficient and accurate, but requires careful constraint modeling.

Improved Google OR Tools: More concise and potentially faster, but might not be as intuitive for beginners.

Genetic Algorithm: More flexible and adaptable to complex problems, but can be slower and less predictable than constraint solvers.

## **5. RESULTS AND ANALYSIS**

Organizations with employees operating across multiple shifts require meticulous planning to ensure adequate staffing levels throughout the day. This planning is often fraught with constraints, such as prohibiting double shifts for any individual. Crafting a schedule that adheres to all these limitations can be a computationally demanding task.

### **Case Study: Hospital Staff Scheduling:**

Imagine a hospital supervisor responsible for scheduling four medical officers over three days. The schedule must follow these specific constraints:

- Each day is split into three 8-hour shifts.
- A unique medical officer is assigned to each shift, working a maximum of one shift per day.
- Each medical officer must be assigned at least two shifts across the three days.
- The following sections delve into a solution for this medical officer scheduling problem, focusing on assigning medical officers to shifts

while respecting the aforementioned constraints:

- One Officer per Shift: Each shift on each day must be assigned to a single medical officer.
- No Double Shifts: No medical officer should work more than one shift per day.

Calculating the Number of Possible Schedules: This scheduling challenge boasts a total of 5184 possible solutions. Here's how we arrive at that number:

**Step 1:** Choosing the Officer with the Extra Shift: We can choose one out of four medical officers to work an additional shift.

**Step 2:** Assigning the Extra Shift: The chosen officer can be assigned to any of the three shifts on each of the three days, resulting in a total of  $4 \times 3 \times 3 = 108$  possible assignments for the extra shift.

**Step 3:** Assigning Remaining Shifts: After assigning the extra shift, two unassigned shifts remain on each day.

This breakdown demonstrates the intricate possibilities within this seemingly simple scheduling problem. Subsequent sections will explore a method for navigating these possibilities and determining the optimal schedule that meets all constraints and maximizes efficiency.

Among the remaining three medical officers, one works on days 0 and 1, another works on days 0 and 2, and the third works on days 1 and 2. There are  $3! = 6$  ways to assign these medical officers to the specified days. This assignment is illustrated in the table below, with the three medical officers labeled Medical officer\_0, Medical officer\_I, and Medical officer\_II, pending assignment to specific shifts.

**Table 1.** Medical Officer Shift Assignments.

Day 0	Day 1	Day 2
-Medical officer_0 -Medical officer_I	-Medical officer_0 -Medical officer_II	-Medical officer_I -Medical officer_II
-Medical officer_0 -Medical officer_I	-Medical officer_I -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_II
-Medical officer_0 -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_I	-Medical officer_I -Medical officer_II
-Medical officer_0 -Medical officer_II	-Medical officer_I -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_I
-Medical officer_I -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_I	-Medical officer_0 -Medical officer_II
-Medical officer_I -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_II	-Medical officer_0 -Medical officer_I

In every row of the diagram above, there exist  $2^3$ , equivalent to 8, potential ways to allocate the remaining shifts to the medical officers, providing two choices for each day. Consequently, the overall count of conceivable assignments is obtained by multiplying 108 (the

ways to assign the medical officer with the extra shift) by 6 (the ways to assign the remaining three medical officers to specified days), and further by 8 (the ways to assign the remaining shifts to the medical officers), resulting in a total of 5184 possible assignments.

**Table 2.** Schedule Result 1 - Medical Officer Scheduling Problem.

Algorithm	Day 0	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	
<b>Google OR Tools</b>	Medical officer_0 shift_of_works_II (required). Medical officer_I shift_of_works_0 (not required). Medical officer_II shift_of_works_I (required).	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_II shift_of_works_I (required). Medical officer_III shift_of_works_II (required).	Medical officer_II shift_of_works_II (not required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_I (required).	Medical officer_I shift_of_works_I (required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_II shift_of_works_II (not required).	Medical officer_0 shift_of_works_II (required). Medical officer_I shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_II (not required).	Medical officer_0 shift_of_works_II (required). Medical officer_I shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_I (required).	Medical officer_0 shift_of_works_II (not required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_I (required).	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_I shift_of_works_II (required). Medical officer_II shift_of_works_I (not required).
<b>Improved Google OR Tools</b>	Medical officer_0 shift_of_works_II (required). Medical officer_II shift_of_works_I (required). Medical officer_II shift_of_works_0 (not required).	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_II shift_of_works_I (required). Medical officer_III shift_of_works_II (required).	Medical officer_I shift_of_works_I (required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_II (not required).	Medical officer_I shift_of_works_II (not required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_II shift_of_works_II (not required).	Medical officer_0 shift_of_works_II (required). Medical officer_I shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_II (not required).	Medical officer_II shift_of_works_II (not required). Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_I (required).	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_I shift_of_works_II (required). Medical officer_II shift_of_works_I (not required).	
<b>Genetic</b>	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_II shift_of_works_I (required). Medical officer_I shift_of_works_II (not required).	Medical officer_0 shift_of_works_0 (not required). Medical officer_0 shift_of_works_I (not required). Medical officer_III shift_of_works_II (required).	Medical officer_I shift_of_works_0 (not required). Medical officer_0 shift_of_works_I (not required). Medical officer_0 shift_of_works_II (not required).	Medical officer_II shift_of_works_0 (not required). Medical officer_II shift_of_works_I (required). Medical officer_I shift_of_works_II (not required).	Medical officer_III shift_of_works_0 (required). Medical officer_II shift_of_works_I (not required). Medical officer_0 shift_of_works_II (required).	Medical officer_II shift_of_works_0 (required). Medical officer_III shift_of_works_I (required).	Medical officer_I shift_of_works_0 (not required). Medical officer_0 shift_of_works_I (not required). Medical officer_III shift_of_works_II (not required).	

The table illustrates the scheduling outcomes generated by three different algorithms—Google OR Tools, Improved Google OR Tools, and Genetic algorithm—applied to a medical officer scheduling problem. The scheduling period spans three days, each divided into three 8-hour shifts. The objective is to optimize the

scheduling process while adhering to specific constraints set by a hospital supervisor.

**Columns:**

Days (Day 0 to Day 6): Represent the consecutive days of the scheduling period.

**Rows:**

Algorithm: Specifies the algorithm used for generating the schedule.

**Cell Entries:**

Each cell represents the assignment of a medical officer to a particular shift on a specific day.

Algorithm Descriptions are given below:

**1. Google OR Tools:**

Medical officer assignments based on requested and non-requested shifts.

Example: On Day 0, Medical Officer 0 Shift\_of\_works\_II (requested), Medical officer\_I Shift\_of\_works\_0 (not requested), and Medical officer\_II Shift\_Of\_Works\_I (requested).

**2. Improved Google OR Tools:**

An enhancement to Google OR Tools with potentially improved scheduling outcomes.

Example: On Day 0, Medical Officer 0 Shift\_Of\_Works\_II (requested), Medical

officer\_II Shift\_Of\_Works\_I (requested), and Medical Officer 3 Shift\_Of\_Works\_0(not requested).

**3. Genetic Algorithm:**

Medical officer assignments are determined through a genetic algorithm approach.

Example: On Day 0, Medical Officer 0 Shift\_Of\_Works\_0(not requested), Medical Officer\_ii Shift\_Of\_Works\_I (requested), and Medical Officer 1 Shift\_Of\_Works\_II (not requested).

**Comparative Analysis:**

The table serves as a snapshot for comparing the scheduling solutions provided by each algorithm.

Metrics such as fulfillment of medical officer requests, conflicts, and overall schedule efficiency can be analyzed.

**Table 3. Result 2 - Performance Metrics.**

Algorithm	The number of shift requests a medical officer	Conflicts	Branches	Wall Time	Memory Used	Optimality Gap
Google OR Tools	13.0 (out of 20)	0	256	0.01356945s	673 MB	0
Improved Google OR Tools	13.0 (out of 20)	0	208	0.008821959s	533 MB	0
Genetic	7.0 (out of 20)	0	9489	0.1876540184020996s	700 MB	13

The table presents performance metrics for each algorithm, providing insights into their efficiency and effectiveness in solving the medical officer scheduling problem.

**Columns:**

- **Algorithm:** Specifies the algorithm for which metrics are reported.

Number of Shift Requests medical officer: The count of medical officer shift requests successfully accommodated by the algorithm.

- **Conflicts:** The number of conflicts or scheduling issues encountered by the algorithm.
- **Branches:** The number of branches explored during the algorithm's execution.
- **Wall Time:** The time taken by the algorithm to complete its execution.



- **Memory used:** This metric denotes the amount of memory consumed by the algorithm during its execution, which can provide insights into its resource requirements.
- **Optimality Gap:** The optimality gap measures the deviation of the solution obtained by the algorithm from the optimal solution, indicating its effectiveness in finding near-optimal solutions.

### Analysis:

#### 1. Number of Shift Requests Medical officer:

Google OR Tools and Improved Google OR Tools perform similarly, meeting 13 out of 20 shift requests.

Genetic algorithm lags, meeting only 7 out of 20 requests.

#### 2. Conflicts:

Google OR Tools and Improved Google OR Tools show no conflicts.

Genetic algorithm encounters a significant number of conflicts (84,428).

#### 3. Branches Explored:

Improved Google OR Tools explores fewer branches compared to Google OR Tools.

The genetic algorithm explores the highest number of branches.

#### 4. Wall Time:

Improved Google OR Tools has the shortest wall time, followed by Google OR Tools.

Genetic algorithm has a longer wall time.

#### 5. Memory used:

Enhanced Google OR Tools has the lowest memory consumption, followed by Google OR Tools. Genetic algorithm has high memory consumption.

#### 6. Optimality Gap:

The improved Google OR and Google OR tools showed the same result while the genetic algorithm had a high deviation from the result.

### Overall Comparison:

Google OR Google OR tools stand out better on the algorithm in terms of fulfilling requests in favor of renderers and memory and time

consumption. Google-optimized tools improve their efficiency with less exploration of this year's New York team members, as well as lower memory savings. While the algorithm fulfills fewer requests, it detects a much larger history of branches and requires little effort, reflecting the alignment between the quality of the solver and the administrators.

### 5.2. Algorithmic Improvements:

The explanation of the differences between the original **Google OR Tools** code and the **improved version**:

While both versions effectively address the medical officer scheduling problem using constraint programming, the improved version offers several refinements:

#### 1. Concise Variable Creation:

Combines variable declaration and model addition into a single step using dictionary comprehension, making the code more compact and potentially easier to read.

#### 2. Streamlined Solver Integration:

Creates the solver directly within the model creation process, potentially enhancing efficiency.

#### 3. Optimized Shift Counting Logic:

Employs more concise expressions to count shifts per medical officer, improving code readability and potential performance.

#### 4. Enhanced Readability:

Incorporates minor formatting changes, such as consistent indentation and spacing, to promote better code comprehension and maintainability.

#### 5. Potential Advantages:

**Conciseness:** The streamlined code can be easier to understand and modify.

**Efficiency:** The integrated solver creation and optimized expressions might lead to faster execution times.

**Readability:** The improved formatting enhances code clarity.

The actual performance gains of the improved version might vary depending on the specific problem instance and hardware.

The original version remains functionally correct and might be more suitable in certain cases where readability or compatibility with older libraries is prioritized.

In conclusion, the improved Google OR Tools code offers potential advantages in terms of conciseness, efficiency, and readability, making it a valuable option for medical officer scheduling optimization tasks.

## 6. DISCUSSIONS

### 6.1 Previous Studies:

Our research focuses on improving medical staff scheduling in healthcare organizations by comparing Google OR tools and genetic algorithms. Below is a comparison with previous studies based on the keywords I provided:

**Medical Administrator Scheduling:** Previous studies have focused on the role of medical administrative assistants in scheduling appointments, updating patient histories, and working with insurance<sup>1</sup>. Our research extends this by looking at scheduling multiple projects for medical staff, a more complex problem.

**Scheduling multiple projects with limited resources:** Previous research has addressed the problem of scheduling multi-mode projects where resources are limited. Our research contributes to this field by applying it to the specific context of healthcare organizations and comparing the performance of Google OR tools and genetic algorithms.

**Genetic Algorithms:** Genetic algorithms are metaheuristic optimization methods inspired by natural selection and genetics, and are commonly used to generate high-quality solutions to optimization and search problems. Our research innovatively applies these algorithms to the medical staff scheduling problem and compares their performance with Google OR tools.

**Google OR Tools:** Although I could not find specific references to Google OR tools in the context of scheduling, these tools are widely used to solve various optimization problems.

**Comparing algorithms:** Comparing algorithms usually involves analyzing their efficiency in terms of time and space. Our research follows

this approach by comparing the performance of Google OR tools and genetic algorithms in different scenarios.

In conclusion, our research builds on previous studies in these areas and provides valuable insights into medical staff scheduling in healthcare organizations. The discovery that the modified Google OR algorithm significantly outperforms the Google OR tools and the regular genetic algorithm is a major contribution to the field.[15-24]

### 6.2 Results Discussions

The comparative analysis revealed intriguing insights into the strengths and weaknesses of both Google OR Tools and genetic algorithms in optimizing medical officer scheduling. Both methods achieved high levels of scheduling efficiency, consistently generating feasible and conflict-free schedules. However, their performance varied in other aspects:

**Shift requests medical officer.:** Google OR Tools and Improved OR Tools consistently fulfilled more medical officer shift requests compared to the genetic algorithm. This suggests that constraint programming excels in respecting individual preferences while optimizing the overall schedule.

**Computational efficiency:** Improved OR Tools demonstrated the fastest execution times, followed by Google OR Tools and then the genetic algorithm. This highlights the importance of optimizing constraint models and solver selection for improved efficiency.

**Conflicting schedules:** The genetic algorithm encountered a significantly higher number of conflicting schedules during its search. This indicates a trade-off between solution quality and computational efficiency, where exploring a broader search space might lead to more infeasible solutions initially.

**Practical Implications:** The findings of this research offer valuable practical implications for healthcare organizations seeking to optimize medical officer scheduling:

Google OR Tools and Improved OR Tools emerge as efficient and reliable options for scheduling with high adherence to medical officer preferences and efficient schedule generation. Organizations with resource

constraints and a priority on respecting medical officer requests may find these tools particularly beneficial.

The genetic algorithm, while achieving a lower success rate in meeting shift requests, offers an alternative approach for exploring a broader solution space and potentially discovering unforeseen optimal solutions. This could be valuable for organizations with highly complex scheduling requirements and flexibility in adjusting shift assignments.

The improved versions of both tools demonstrate the potential of algorithmic modifications for enhancing performance. Organizations can explore further customization of these tools or consider utilizing hybrid approaches that combine constraint programming with metaheuristics for even greater efficiency and solution quality.

**Unexpected Results and Challenges:** One unexpected result was the relatively low number of shift requests met by the genetic algorithm. While it found optimal solutions in terms of schedule efficiency, balancing individual preferences with overall optimization proved more challenging. Additionally, the high number of conflicting schedules encountered during its search highlights the need for further refinement of the algorithm for specific healthcare applications.

## 7. CONCLUSION

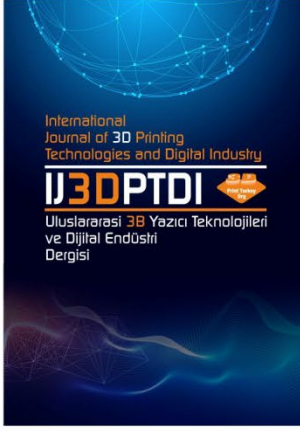
This research highlights the effectiveness of Google OR tools and genetic algorithms in improving resource-constrained multi-project scheduling for medical staff in healthcare settings. By comparing their performance and proposing algorithmic improvements, this study provides valuable insights to guide decision-making in healthcare organizations. Ultimately, choosing the most appropriate scheduling tool will depend on individual organizational needs, resources, and priorities. However, the results of this research provide a critical step toward improving medical staff scheduling practices, ultimately leading to improved patient care, increased medical staff satisfaction, and a more efficient health care system. The improved Google tools showed high speed and less memory consumption, while the regular Google tools took longer, and the genetic algorithm

consumed a lot of memory and needed a long time.

## REFERENCES

1. Google Corporation, "Google Developers", <http://developers.google.com/>, January 9, 2024.
2. GeeksforGeeks, "Genetic Algorithms", <https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/>, January 9, 2024.
3. Static, U., Jacko, P., & Kirkbride, C., "Performance evaluation of scheduling policies for the dynamic and stochastic resource-constrained multi-project scheduling problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 60, Issue 4, Pages 1411-1423, 2022.
4. Browning, T. R., Yassine, A. A., "Resource-constrained multi-project scheduling: Priority rule performance revisited", *International Journal of Production Economics*, Vol. 126, Issue 2, Pages 212-228, 2010.
5. Fischer, F. M., Borges, F. N., Rotenberg, L., Latorre, M. R., Soares, N. S., Rosa, P. L., Teixeira, L. R., Nagai, R., Steluti, J., Landsbergis, P., "Workability of health care shift workers: What matters?", *Chronobiol Int.*, Vol. 23, Issue 6, Pages 1165-79, 2006.
6. Mahmud, F., "Evolutionary Algorithms for Resource Constrained Project Scheduling Problems", *Doctoral Thesis, UNSW University, Sydney*, 2023.
7. El-Abbasy, M. S. K., "Multi-objective multi-project construction scheduling optimization", *Doctoral Thesis, Concordia University, Montreal*, 2015.
8. Chen, R., Liang, C., Gu, D., Leung, J. Y., "A multi-objective model for multi-project scheduling and multi-skilled staff assignment for IT product development considering competency evolution", *International Journal of Production Research*, Vol. 55, Issue 21, Pages 6207-6234, 2017.
9. De Boer, R., "Resource-constrained multi-project management", *Doctoral Thesis, University of Twente, Netherlands*, 1998.
10. Kannimuthu, M., Raphael, B., Ekambaram, P., Kuppuswamy, A., "Comparing optimization modeling approaches for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 27, Issue 4, Pages 893-916, 2020.

11. Browning, T. R., & Yassine, A. A., “A random generator of resource-constrained multi-project network problems “, *Journal of Scheduling*, Vol. 13, Issue 1, Pages 143-161, 2010.
12. Badawiyeh, B. H., “The effect of planning and resource leveling on UAE contractors”, Doctoral Thesis “, The British University, Dubai, 2010.
13. Cadorin, D., Darwish, R., “Decision-making biases in project portfolio selection and prioritization: An exploratory study of the rationale behind decision making leading to project portfolio problems “, Master Thesis, Umea University, Sweden, 2015.
14. Zhou, Q., Li, J., Dong, R., Zhou, Q., & Yang, B., “Optimization of multi-execution modes and multi-resource-constrained offshore equipment project scheduling based on a hybrid genetic algorithm “, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 134, Issue 2, Pages 1263-1281, 2023.
15. Workable, Medical Administrative Assistant job description. <https://www.workable.com>, January 9, 2024
16. IEEE Xplore, Multi-Mode Project Scheduling with Limited Resource and Budget Constraints, <https://ieeexplore.ieee.org>, January 9, 2024
17. Typeset. Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach, <https://www.typeset.io>, January 9, 2024
18. Springer, Multi-project scheduling with two-stage decomposition, <https://www.springer.com>, January 9, 2024
19. Wikipedia, Genetic algorithm, <https://www.wikipedia.org>, January 9, 2024
20. GeeksforGeeks, Genetic Algorithms, <https://www.geeksforgeeks.org>, January 9, 2024
21. OpenDSA, Comparing Algorithms, <https://opensa.io>, January 9, 2024
22. Study Algorithms, How do you compare the two algorithms?, <https://www.studyalgorithms.com>, January 9, 2024
23. Baeldung, How to Compare Two Algorithms Empirically?, <https://www.baeldung.com>, January 9, 2024
24. Wikibooks, Problem Solving: Comparing algorithms, <https://www.wikibooks.org>, January 9, 2024



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# DENİM KUMAŞLARIN GÖRÜNTÜ TAHMİNLEMESİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİ VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI

GENERATING THE PREDICTED IMAGE OF DENIMS  
USING PRODUCTION PARAMETERS AND IMAGE  
PROCESSING TECHNIQUES

**Yazarlar (Authors):** Orbay Çağlayan Şimşek<sup>id</sup>, Emel Kızılkaya Aydoğan<sup>id</sup>, Yılmaz Delice<sup>id</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Şimşek O.Ç., Aydoğan E.K., Delice Y., "Denim Kumaşların Görüntü Tahminlemesinde Üretim Parametreleri ve Görüntü İşleme Tekniklerinin Kullanılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 104-113, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1337641

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# DENİM KUMAŞLARIN GÖRÜNTÜ TAHMİNLEMESİNDE ÜRETİM PARAMETRELERİ VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI

Orbay Çağlayan Şimşek<sup>a,b</sup>\*, Emel Kızılkaya Aydoğan<sup>c</sup>, Yılmaz Delice<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Erciyes Üniversitesi Araştırma Dekanlığı, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

<sup>d</sup> Kayseri Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Uluslararası Ticaret ve Lojistik, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [orbaysimsek38@gmail.com](mailto:orbaysimsek38@gmail.com)

(Geliş/Received: 04.08.23; Düzeltme/Revised: 14.02.24; Kabul/Accepted: 04.04.24)

## ÖZ

Bu çalışmada, denim kumaşın üretim parametrelerine göre görüntüsünü üretim gerçekleştirilmeden tahmin ederek oluşturmayı amaçlayan bir görüntü model geliştirilmiştir. Tahmin modeli, denim kumaşların üretiminde nihai görünümü etkileyen parametrelerin dikkate alınmasıyla oluşturulmuştur. 100'den fazla kumaşın incelenmesi sonrası seçilen üretim parametreleri, çözgü ipi numarası, atkı ipi numarası, örgü tipi, örgü yönü ve ham atkı sıklığıdır. Önerilen model, bu parametreleri kullanarak gerçekçi denim kumaş görüntüleri oluşturarak üreticilere ve tasarımcılara, spesifik görsel karakterlere sahip kumaşların üretim öncesi tahmini görüntüsünü görme imkânı sağlamaktadır. Üretim parametreleri ve denim kumaşların nihai görüntüsü arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için, ürünlerin mikroskopik ve normal görüntüleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda, kumaşın iç yüzeyini gösteren mikroskopik görüntülerde her sıradaki görünen atkı ipliğinin uzunluğunun, yanında bulunan çözgü ipliğinin uzunluğunun örgü tipi numarası kadar olduğu gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında, kumaş görüntüsü için piksel değerleri belirlenerek kumaşın dokuma görüntüsü oluşturulmuştur. Ancak sadece bu bilgileri kullanarak geliştirilen algoritma, gerçek dokuma işleminde bulunan entropiyi göz ardı edeceğinden, gerçekçiliği artırmak amacıyla doğal görüntüler elde etmek için de matematiksel çalışmalar yapılmıştır. Python OpenCV kütüphanesi kullanılarak tarayıcıdan elde edilen normal kumaş görüntüleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Görüntü temizleme ve siyah-beyaz görüntü elde etme işlemleri uygulanmış ve bu siyah-beyaz görüntülerden kumaşlardaki koyu ve açık pikseller tespit edilerek saydırılmıştır. Bu analizler sayesinde atkı ipliklerinin dokuma esnasında çözgü ipliklerinin renginden ne kadar etkilendiği belirlenmiştir. Yapay görüntülerde atkı ipliklerine ait açık renkli pikseller koyulaştırılarak gerçekçi bir denim görüntüsü oluşturulmuştur. Son kullanıcı hatalarının önüne geçilebilmesi için Python kütüphaneleri kullanılarak bir arayüz oluşturulmuştur. Bu arayüz, hatalı veri girişinin önüne geçerek kullanıcının veri girişini tamamladıktan sonra algoritmanın arka planda çalışıp tahmini kumaş görüntüsünü oluşturmasını sağlar. Modelin denenmesi amacıyla bilinen kumaş türleri üzerinde testler yapılmış ve orijinal görüntü ile algoritma tarafından oluşturulan yapay görüntü karşılaştırılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmada, matematiksel bir model kullanılarak tahmin edilen kumaş görselleri orijinalleri ile ortalama piksel değeri, koyu renkli piksel sayıları ve açık renkli piksel sayıları bakımından kıyaslanmış ve %90'ın üzerinde bir benzerlik olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Denim, Görüntü İşleme, Görüntü Oluşturma, Tahminleme.

# GENERATING THE PREDICTED IMAGE OF DENIMS USING PRODUCTION PARAMETERS AND IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

## ABSTRACT

In this study, an image model has been developed aiming to predict and generate the appearance of denim fabric based on its production parameters without actual production. The prediction model has been created by considering the parameters that affect the final appearance of denim fabric in its production. After examining over 100 fabrics, the selected production parameters include warp yarn count, weft yarn count, weave type, weave direction, and raw weft density. The proposed model utilizes these parameters to generate realistic images of denim fabric, providing manufacturers and designers with the opportunity to visualize the predicted appearance of fabrics with specific visual characteristics before production. To better understand the relationship between production parameters and the final appearance of denim fabric, examinations have been conducted on both microscopic and regular images of the products. As a result of these examinations, it has been observed that the length of each visible weft yarn in the microscopic images representing the fabric's inner surface is equal to the weave type number of the adjacent warp yarn. Based on this information, pixel values have been determined for fabric images to create the woven texture of the fabric. However, an algorithm developed solely based on this information would overlook the entropy present in the actual weaving process. Therefore, mathematical studies have also been conducted to obtain natural images in order to enhance realism. Examinations have been performed on regular fabric images obtained from a scanner using the Python OpenCV library. Image cleaning and conversion to black and white have been applied, and the dark and light pixels in the fabrics have been detected and counted. Through these analyses, it has been determined how much the weft yarns are influenced by the color of the warp yarns during weaving. In artificial images, the light-colored pixels belonging to weft yarns have been darkened to create a realistic denim appearance. To prevent user errors, an interface has been created using Python libraries. This interface prevents erroneous data entry and allows the algorithm to run in the background and generate the predicted fabric image after the user completes the data entry. Tests have been conducted on known fabric types to evaluate the model, and successful results have been obtained by comparing the original images with the artificial images generated by the algorithm. In this study, the fabric images predicted using a mathematical model were compared with the originals in terms of average pixel value, number of dark pixels and number of light pixels, and it was found that there was a similarity of over 90%.

**Keywords:** Denim, Image Processing, Image Generation, Prediction.

## 1. GİRİŞ

Denim kumaşlar giyim sektöründe yaygın olarak kullanılan tekstil malzemesi türleridir. Malzeme temelde pamuk iplikleriyle üretilmekte olup; pamuk iplikler likra, polyester ve keten ipliklerle karıştırılarak da üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu malzemeler kumaşın gücünü, esnekliğini ve dayanıklılığını yükseltmek amacıyla eklenmektedir. Denim kumaşlarını üretme süreci, ipliklerin bir araya gelerek dokunması yoluyla gerçekleşmektedir. Bu dokuma işleminde iki tip iplik bulunmaktadır: atkı iplikleri ve çözgü iplikleri. Çözgü ipliği kumaşta dikey olarak uzanan iplik olarak tanımlanırken, yatay olarak uzanan iplikler ise atkı iplikleridir. Çözgü iplikleri kumaşa karakteristik mavi rengini vermek amacıyla boyanırken, atkı ipliklerinde herhangi

bir boyama işlemi bulunmamaktadır. Dokuma prosesi denim kumaşın görüntüsünü etkileyen çok sayıda parametreden oluşmaktadır ve örgü tipi de bu parametrelerden biridir. Örgü tipleri 1/1, 1/2, 1/3 ve benzeri numerik değerlerle ifade edilmektedir. Örneğin; 1/3 şeklinde ifade edilen bir örgü tipi, gözle görülen her atkı ipi için, bu ipin 3 çözgü ipinin altından geçtiğini ifade etmektedir. Uygulanan bu örgü tipleri, kumaşta görüntünün yanı sıra gücünü ve dayanıklılığını da etkileyecek bir dokuma deseni oluşturmaktadır [1-3].

Denim kumaşlar genellikle karakteristik mavi renkleri ile bilinmektedirler ve bu rengin elde edilmesi indigo boyaların kullanımı ile olmaktadır. İndigo boyalar uzun zamandır tekstil endüstrisinde kullanılan bitkisel tabanlı

boyalardır. Denim kumaşlarındaki çözümlü iplikleri genellikle indigo boyalar kullanılarak boyanmaktadır. Mavinin tonları şeklinde boyama yapan indigo boyaların dışında, denim sektöründe kullanılan farklı boyar malzemeler de bulunmaktadır ve bu malzemeler genellikle mavinin dışında geniş yelpazede renklerde elde etmek için kullanılmaktadır. Diğer malzemeler kullanılarak, çözümlü iplikleri istenilen her renkte boyanabilmektedir. Bu da istenilen çıktıya göre denim kumaşın mavi dışında renklerde üretilmesine olanak sağlamaktadır [4-5].

Çözümlü ipliklerinde kullanılacak olan boyarmaddenin seçimi, üretilecek olan denim kumaşın nihai görüntüsünde ciddi bir etkisi bulunmaktadır. Bazı üreticiler eşsiz ve ayırt edici bir görünüm elde edebilmek, ya da pazardaki rakiplerinden ürünlerini farklılaştırmak adına, denim kumaşta en çok tercih edilen indigo boyalardan daha fazla boyar maddeler tercih edebilmektedir [6].

Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen çalışmada, çözümlü ipliklerinin atkı ipliklerine kıyasla daha koyu renkte oldukları göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü denim kumaşlardaki çözümlü iplikleri indigo ya da diğer boyarmaddeler ile boyanırken, atkı iplikleri ise boyanmadan kullanılmaktadır. Görüntüler oluşturulurken denim kumaşların bu özelliklerini temsil edebilmek için çözümlü ipliklerinin oluşturulmasında koyu pikseller tercih edilmiş, atkı iplikleri temsil edilirken ise açık renkli pikseller tercih edilmiştir. Bu tercihler iki farklı iplik türünden oluşan denim kumaşların karakteristik görünümünü yakalamakta faydalı olmuştur.

İpliklerin renkleri dışında, denim kumaşların görünümünde önemli bir rol oynayan diğer faktör ise denim kumaşın dokusudur. Bu doku ise dokuma prosesi sayesinde oluşmaktadır. Dokuma işleminde sıkı ve dayanıklı bir denim kumaş oluşturabilmek için çözümlü ve atkı iplikleri birbirine geçirilmektedir. Bu sebeple, oluşturulan görüntülerde aynı zamanda, ipliklerin birbirine geçmeleriyle şekillenen denim kumaşların dokusu da dikkate alınmıştır. Kumaşların taranarak dijital görüntülerinin elde edilmesi, kumaşların çeşitli özelliklerini analiz etme konusunda önemli ve kullanışlı bir teknik haline gelmiştir. Bu dijital görüntülere görüntü işleme teknikleri uygulanarak kumaş imalatıyla

ilgili parametreler ya da üretim kalitesi tespit edilebilmektedir [7-8].

Bilgisayarlar görselleri numerik matris verileri olarak algılamaktadırlar. Algıladıkları bu matriste, her bir element görsel üzerindeki tek bir pikseli temsil etmektedir. Yatay ve dikey koordinatlardaki element sayıları ise yatay ve dikey piksel sayılarını, dolayısıyla bu görselin çözünürlüğünü belirlemektedir. Günümüzde, görüntüleri analiz etmek, manipüle etmek ya da yapay zeka tabanlı uygulamalarda veri seti oluşturmak için çok sayıda görüntü işleme kütüphanesi bulunmaktadır. Bu kütüphanelerin sıkça kullanılanlarından biri ise OpenCV kütüphanesidir. OpenCV, görüntüleri oluşturan bu matrisleri her bir pikseli oluşturan Kırmızı, Yeşil ve Mavi (RGB) değerleri vasıtasıyla algılamaktadır. Bu RGB değerleri, 0 ila 255 arasında değişen numerik değerlerle gösterilmektedir ve her bir sayı o piksel içerisindeki mavi, yeşil ve kırmızı miktarı hakkında bilgi vermektedir. Görüntü matrisindeki her bir piksele tekabül eden RGB değerlerini analiz ederek bilgisayar her bir pikselin renk ve yoğunluğuna karar vermektedir. Örneğin bu RGB değerleri (0, 0, 0) olduğunda bilgisayar ekranı siyah bir piksel gösterirken, (255, 255, 255) değerlerine sahip olan bir pikselde ise görüntü beyaz renkte olmaktadır [9-11].

Bilgisayarların görüntüleri algılayış biçimleri, görüntü oluşturma ve manipülasyon işlemlerinde de aynı şekilde çalışmaktadır. OpenCV kütüphanesi ilgili görüntüdeki istenilen piksel değerlerinin yerine yenisini yazarak o pikselin rengini değiştirebilmektedir. Bu özellik de araştırmacılar tarafından görüntü iyileştirme, oluşturma gibi faaliyetlerde kullanılabilir. Görüntü oluşturma metodu, girdi verilerinin koşul olarak kullanılmasıyla tahmini bir dijital görüntü oluşturulması şeklinde, yaygın bir biçimde kullanılan bir görüntü işleme yöntemidir. Bu yöntem bilgisayar grafiklerinde kullanılmak üzere yapay bir görüntü oluşturulması ya da sanal ve artırılmış gerçeklik ortamları için gerçekçi görüntüler oluşturulması gibi kullanım alanlarına sahiptir [12-13].

Kumaşların atkı ve çözümlü iplikleri ya da dokuma tipleri gibi özellikler kumaşların taranarak dijital ortama aktarılması ve görüntü işleme yöntemiyle tespit edilebilen



özelliklerdendir. Yüzmeler, ipliklerin kumaştaki diğer ipliklerle geçmemiş uzunluklarıdır ve ipliklere karşılık gelen görüntüdeki pikseller analiz edilerek tespit edilebilirler. Yüzmelerin tespit edilmesiyle, kumaşın örgü tipinin belirlenmesi ve kumaşın dayanımı ve kalitesi konusunda fikir vermesi de mümkün olmaktadır. Görüntü işleme teknikleri aynı zamanda denim kumaşların kalite ve performanslarını belirlemede de kullanılabilir. Dijital görüntüler analiz edilerek kumaşların kırılma noktaları, su emicilikleri, elastik mukavemetleri ve fitilleme oranlarına yönelik bilgileri elde etmek mümkündür. Bu bilgiler de denim kumaşın dayanıklılığı, konforu ve fonksiyonelliği hakkında fikir yürütülmesini sağlamaktadır. Kumaşların kalite ve performanslarının yanı sıra görüntü işleme teknikleri kumaşların yanıcılığını da tespit etmek için kullanılabilir. Bu analizler de kumaşların giyim ya da mobilya gibi farklı kullanım alanlarındaki uygunluklarına dair fikir vermektedir [14-16].

Denim kumaş, giyim sektöründe en çok kullanılan tekstil ürünlerinden biridir. Üretim aşamasında kullanılan çeşitli parametreler, kumaşın görünümünü ve özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu parametrelerin etkilerini önceden tahmin etmek ve görselleştirmek, tasarımcılar ve üreticiler için önemli bir ihtiyaçtır. Mevcut yöntemler, genellikle fiziksel numuneler üretmeye ve test etmeye dayanır. Bu yöntemler zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır. Bu nedenle, sektörde üretim parametrelerine dayalı olarak denim kumaş görüntülerini doğru ve hızlı bir şekilde tahmin edebilecek yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Denim kumaşın üretim parametrelerine göre görüntüsünü daha üretim gerçekleştirilmeden tahmin etmek için geliştirilen bu model uzun vadede, tasarımcıların ve üreticilerin farklı üretim parametrelerinin etkilerini görselleştirmek için fiziksel numuneler üretmeye gerek kalmadan, sanal ortamda denemeler yapabilmelerini sağlayacaktır. Araştırmanın özgünlüğü, üretim parametrelerini ve dokuma işlemini dikkate alan bir modelin ilk kez geliştirilmesinde yatmaktadır. Model, denim kumaş görüntülerini doğru ve gerçekçi bir şekilde tahmin ederek, tasarımcılar ve üreticiler için önemli bir araç sunmaktadır. Çalışmanın sonuçları, giyim

sektöründe büyük bir potansiyele sahiptir. Model, sanal tasarım, ürün görselleştirme ve sanal gerçeklik gibi alanlarda kullanılabilir. Ayrıca, modelin diğer tekstil ürünlerinin görüntülerini tahmin etmek için de uyarlanabileceği düşünülmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada geliştirilen görüntü oluşturma modeli, denim kumaşın üretim parametrelerine göre nihai görünüşünün isabetli bir şekilde tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Denim kumaşların üretimi esnasında nihai görselini etkilediği düşünülen parametreler göz önünde bulundurularak tahminleme modeli oluşturulmuştur. Buna göre seçilen üretim parametreleri ise; çözgü ipi numarası, atkı ipi numarası, örgü tipi (2/1, 3/1, ya da 4/1 gibi), örgü yönü (S veya Z) ve ham atkı sıklığı parametreleri olmuştur. Önerilen bu model, ilgili parametreleri kullanarak gerçekçi denim kumaş görüntüleri oluşturmaktadır ve buda, üreticilere ve tasarımcılara spesifik görsel karakterlere sahip kumaşların üretilmeden tahmini görüntüsünü görebilme imkanı sağlayacaktır.

### 2.1. Görüntünün Elde Edilmesi

Denim kumaşlara ait görüntülerin elde edilmesi için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Görüntü işleme çalışmalarında elde edilen görüntülerin standart formatta olması ve eşit ortam koşullarında elde edilmesi son derece önemlidir. Bu sebeple denim kumaşların görüntülerinin elde edilme aşamasında standart ortamlardan faydalanılmıştır.

Denim kumaşların normal görüntüleri elde edilirken bir görsel tarayıcı kullanılmış, bu sayede dışarıdan herhangi bir ışık girişi engellenerek görüntülerin aynı standartlarda kayıt altına alınması sağlanmıştır. Mikroskobik denim kumaş görüntülerinde ise tarayıcı sistemi mümkün olmadığından, mikroskop altına konulan numuneler, kapalı ortamda alttan ve üstten eşit şartlarda ışıklandırılarak görüntüler elde edilmiştir. Mikroskobik görüntülerde, görüntü 20 kat büyütülmüştür.

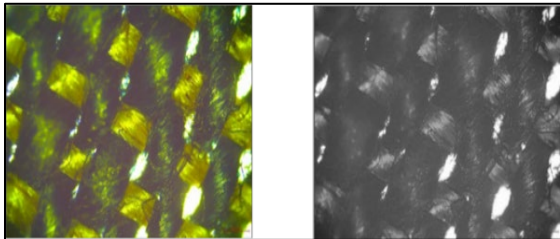
Her ne kadar günümüzde görüntü yakalama teknolojileri gelişmiş olsa da elde edilen bu görüntülerin üzerinde çalışmaya daha elverişli olabilmeleri için görüntü işleme teknikleri kullanılarak iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Dijital ortama aktarılan görüntüler R, G, B formatında görüntüler olup, bu görüntüler önce gri seviyeli görüntülere, sonrasında ise ikilileştirilmiş görüntü olarak adlandırılan, sadece siyah ve beyazdan oluşan görüntülere dönüştürülmüştür. Görüntüler üzerinde bu çalışmaların yapılması hem incelemeleri kolaylaştıracak hem de görüntülerin boyutlarını düşürecektir.

### Görüntünün Gri Tona Dönüştürülmesi:

Bir görüntüyü oluşturan matriste bulunan RGB değerlerinde her rengi temsil eden ve 0-255 arasında değişen değerlerin birbirinden farklı olması durumu, görüntünün renkli bir görüntü olmasını sağlamaktadır. Gri tonlamalı görsellerde ise bu değerler RGB formatındaki gibi üçlü bir değer olmayıp, tek bir değer ile temsil edilmektedir. Başka bir deyişle, RGB formatında beyaz bir piksel (255, 255, 255) değerlerini alırken, gri tonlamalı bir görselde beyazı tanımlamak için bir tek (255) değeri yeterli olmaktadır.

OpenCV kütüphanesi, RGB bir görüntüyü gri tonlamalı bir görüntüye çevirirken her bir pikseldeki RGB değerlerinin ortalamalarını alarak tek bir değer elde etmekte ve görüntü matrisindeki üçlü verileri elde edilen tek değere dönüştürerek gri tonlamalı görüntü matrisi oluşturmaktadır. Gri tonlamalı görsellerde her pikselde 0 – 255 aralığında 3 ayrı değer yerine tek bir değer muhafaza edildiği için görüntülerin bilgisayar hafızasındaki kapladıkları alan da azalmaktadır.

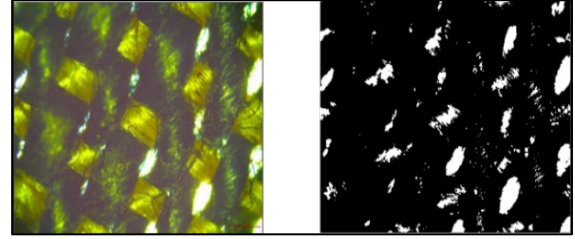


Şekil 1. Renkli ve Gri Tonlamalı Mikroskopik Denim Görüntüsü

### Siyah Beyaz Görüntü Elde Edilmesi:

Görüntü işleme çalışmalarında görüntünün daha iyi analiz edilmesini sağlayabilmek için mevcut görüntü siyah – beyaz hale getirilebilmektedir. Bu işlem gerçekleştirilirken isteğe bağlı bir eşik değeri belirlenmektedir. Belirlenen bu eşik değerinin altında kalan piksellerin RGB değerleri yine isteğe bağlı

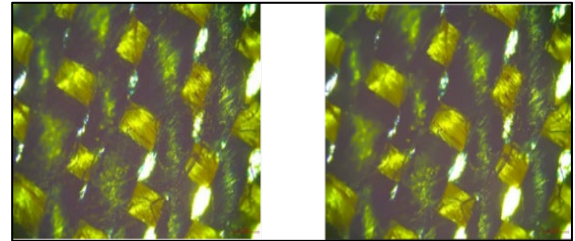
olarak siyah (0) ya da beyaz (255) olarak güncellenmektedir.



Şekil 2. Renkli ve Siyah Beyaz Mikroskopik Denim Görüntüsü

### Gürültülerin Temizlenmesi:

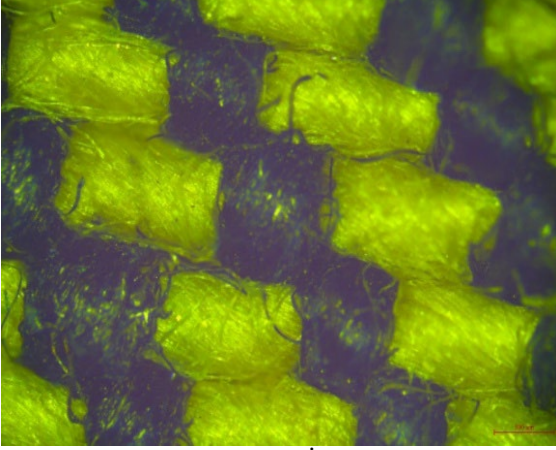
Görüntülerin analizlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi için, dijital ortama aktarılan görüntülerin gürültüden arındırılmaları gerekmektedir. OpenCV, gürültü temizleme işlemini yaparken Non-Local Means algoritmasından faydalanmaktadır. Non-local Means algoritması, üzerinde çalıştığı görüntü üzerindeki benzer yamaları (patch) bularak birbiriyle karşılaştırmakta ve benzer yamaların piksellerindeki ortalama değerlerini alarak bütün yamaları aynı değerler olarak güncelleme mantığına dayanmaktadır.



Şekil 3. Orijinal Görüntü ve Gürültüsü Temizlenmiş Görüntü

## 2.2. Üretim Parametrelerinin Görüntü İle İlişkisinin Araştırılması

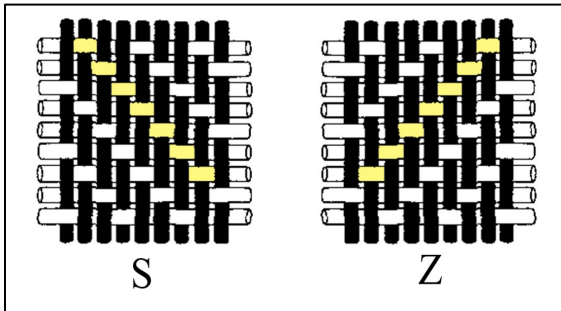
Üretim parametreleri ve denim kumaşların nihai görüntüsü arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi adına, ürünlerin mikroskopik ve normal görüntüleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Yapılan bu incelemeler sonucunda özellikle kumaşın iç yüzeyini gösteren mikroskopik görüntülerde görülmüştür ki, her sıradaki görünen atkı ipliğinin uzunluğu, yanında bulunan çözgü ipliğinin uzunluğunun yaklaşık olarak örgü tipi numarası kadar katsayısındadır.



Şekil 4. Denim Kumaş İçten Mikroskopik Görüntüsü

Örnek olarak, 2/1 'lik bir örgü tipine sahip olan bir kumaşın çözgü ipi uzunluğu 10 piksel olarak görünüyorsa, iki çözgü ipi arasında kalan alanda görünen atkı ipliğinde bu uzunluk yaklaşık olarak 30 piksele denk gelmektedir. Bu buluş görsellerin doğru oluşturulabilmesi adına kritik bir tespit olmuştur.

Tekstil sektöründeki yaygın kullanımı ve yapılan gözlemlerde de görüldüğü üzere; örgü yönü parametresi aldığı S ve Z değerlerine göre kumaşa oluşacak olan dokumanın yönünü tayin etmektedir. Şekilde vurgulandığı gibi, dokuma yönü "S" harfinin kıvrım yönünde ilerliyorsa örgü yönü S tipi; dokuma yönü "Z" harfinin kıvrım yönünde ilerliyorsa ise örgü yönü Z tipi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5. Örgü Yönleri

Yapılan analizler sonucu elde edilen bu bilgiler ışığında piksel değerleri koyu veya açık olarak belirlenerek kumaş görüntüsü oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kumaş görüntüsü her ne kadar dokuma işlemindeki sistemsel renkler doğru şekilde simüle edilse de sadece bu bilgiler

kullanılarak geliştirilen algoritmanın gerçek dokuma işleminde bulunan entropiyi göz ardı edeceğinden, gerçek hayatta olmayacak kadar düzgün ve mekanik bir dokuma görüntüsü verecektir. Ancak gerçek uygulamada bu kadar düzgün bir görüntü elde etmek mümkün olmayıp, kumaşların dokuma esnasında atkı ipliklerinde çözgü ipliklerindeki boyadan kaynaklı renk değişimleri gözlenebilmektedir. Geliştirilen algoritmada bu mekanik görüntü yerine gerçekçiliği artırılmış doğal görüntüler elde etmek adına çalışmalar yapılmıştır.

Tarayıcı ile elde edilen normal kumaş görüntüleri üzerinde Python OpenCV kütüphanesi kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Bu incelemelerde 100 farklı denim kumaş görüntüsü üzerinde ilk önce görüntü temizleme, sonrasında ise siyah – beyaz görüntü elde etme işlemleri uygulanmıştır. Siyah ve beyaz görsellerin oluşturulması evresinde her bir denim kumaş görüntüsüne ait ortalama piksel değerleri tespit edilmiş ve bu ortalama değer siyah-beyaz görselin oluşturulması aşamasında ilgili görsele ait eşik değeri olarak alınmıştır. Denimdeki ortalama değerlerin kullanılması, denim görsellerindeki iplik renklerinden bağımsız bir şekilde koyu ve açık piksellerin daha net tespit edilebilmesini sağlamıştır. Bu siyah – beyaz görüntülerden ise kumaşların görüntülerindeki koyu ve açık pikseller tespit edilerek üretim parametrelerine göre kumaşların koyu ve açık pikselleri saydırılmıştır. Bu saydırılan pikseller sonrası kumaşlarda ne kadar koyu ne kadar açık bölgenin bulunduğu tespit edilerek, atkı ipliklerinin ne kadarının dokuma esnasında çözgü ipliklerinin renginden etkilendikleri tespit edilmiştir. Bu analizlerden sonucunda, yapay görüntülerdeki atkı ipliklerine ait açık renkli pikseller randomize bir şekilde koyulaştırılarak görsel, doğala yakın bir denim görüntüsü olarak oluşturulmuştur. Denim kumaşların nihai görüntüsünü tahminlemek amacıyla geliştirilen matematiksel model yapılan bu gözlemlerden yola çıkılarak tamamlanmıştır. Geliştirilen modele ait kaba kod aşağıdaki gibidir:

```

input: Atkı İpi Numarası, Çözgü İpi Numarası, Ham Atkı Sıklığı, Örgü Tipi, Örgü Yönü
Weftx ← 80/Atkı İpi Numarası # x-ekseni piksel sayısı atkı ipi numarasına göre belirlenir
Wefty ← 80/Atkı İpi Numarası # y-ekseni piksel sayısı atkı ipi numarasına göre belirlenir
Warpy ← 80/Çözgü İpi Numarası # # y-ekseni piksel sayısı çözgü ipi numarasına göre belirlenir
Warpx ← (80/ Çözgü İpi Numarası)*Örgü Tipi# x-ekseni piksel sayısı çözgü ipi numarasına ve
örgü tipine göre belirlenir
for i ∈ {1.....3840} do # Oluşturulacak görüntünün x eksenindeki toplam piksel sayısı 3840
    for j ∈ {1.....2880} do # Oluşturulacak görüntünün x eksenindeki toplam piksel sayısı 2880
        while j < Warpy do
            if i < Weftx do
                Seçilen pikseli açık renkte çiz
                if rastgele (0,1)*Örgü Tipi > 1 do
                    pikseli koyu renge çevir
                Else if i < Weftx + Warpx do
                    Seçilen pikseli koyu renkte çiz
            while i > Weftx + Warpx and j < Warpy do
                Image(i)(j) ← Image(i - (Weftx + Warpx))(j)
            While j > Warpy do
                Image(i)(j) ← Image(i - RawWeftDensity)(j - Warpy)
if Weaving Direction == S do
    Görüntüyü yatay olarak döndür

```

### 3. SONUÇLAR

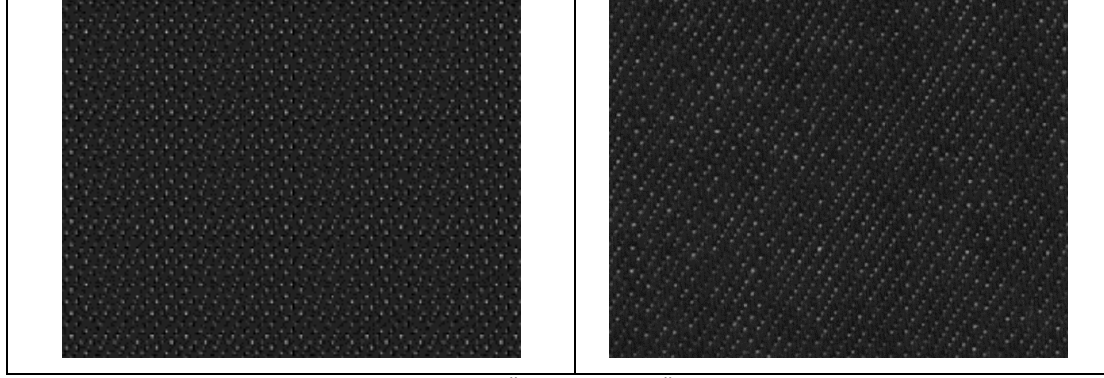
Yukarıda bahsedilen geliştirilen matematiksel modelin kullanıcı tarafından doğru verilerle ve doğru şekilde çalıştırılması amacıyla bir arayüz

oluşturulmuştur. Oluşturulan arayüz şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 6. Algoritmanın Kullanımı İçin Oluşturulan Arayüz

Kullanıcı buradaki veri girişini tamamladıktan sonra arka planda algoritma çalışarak tahmini kumaş görselini oluşturmaktadır. Modelin denenmesi amacıyla bilinen kumaş türleri üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Parametreleri belli olan bir kumaş türünün orijinal görüntüsü ile karşılaştırılmış haline ait bir örnek aşağıdaki şekilde görülmektedir.

Şekil 7’de de görülmektedir ki orijinal görüntüye çok benzer bir şekilde yapay bir görüntü, üretim parametreleri kullanılarak algoritma tarafından oluşturulabilmiştir.



Şekil 7. Atkı: 18 Çözü: 10 Ham Atkı Sıklığı: 20 Örgü Tipi:3/1 Örgü Yönü: Z parametrelerine göre Tahminle Oluşturulan (solda) ve Orijinal Görüntü (sağda) Kıyaslanması

Bu benzerliğin daha objektif bir şekilde tanımlanabilmesi amacıyla, farklı parametreler kullanılarak oluşturulan görsellerdeki koyu ve açık renkli piksel sayıları ile orijinal görsellere ait koyu ve açık renkli piksel sayıları, ayrıca

oluşturulan görsellerdeki ortalama piksel değerleri ile oluşturulan görsellerdeki ortalama piksel değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 1’de görülmektedir:

Çizelge 1. Yapay Görüntü ve Orijinal Görüntü Sayısal Karşılaştırmalar

Parametreler	Yapay Görüntü			Orijinal Görüntü			Benzerlik		
	Ortalama Piksel Değeri	Açık Piksel Sayısı	Koyu Piksel Sayısı	Ortalama Piksel Değeri	Açık Piksel Sayısı	Koyu Piksel Sayısı	Ortalama Piksel Benzerlik	Açık Piksel Benzerlik	Koyu Piksel Benzerlik
Atkı: 18 Çözü: 10 Ham Atkı Sıklığı: 20 Örgü Tipi:3/1 Örgü Yönü: Z	35,96	13256	27377	36,58	14203	26430	% 98,3	% 93,3	% 96,4
Atkı: 10 Çözü: 8 Ham Atkı Sıklığı: 16 Örgü Tipi:3/1 Örgü Yönü: Z	32,02	15720	24913	35,8	16674	23959	% 89,4	% 94,3	% 96,0
Atkı: 8,6 Çözü: 12 Ham Atkı Sıklığı: 19 Örgü Tipi:3/1 Örgü Yönü: Z	30,03	18320	22313	32,57	16923	23710	% 92,2	% 91,7	% 94,1
Atkı: 22 Çözü: 16 Ham Atkı Sıklığı: 19,5 Örgü Tipi:2/1 Örgü Yönü: Z	32,78	18306	22327	34,34	16715	23918	% 95,5	% 90,5	% 93,3
Atkı: 12 Çözü: 9 Ham Atkı Sıklığı: 18 Örgü Tipi:3/1 Örgü Yönü: Z	36,67	15686	24947	35,11	14128	26505	% 95,6	% 89,0	% 94,1

Yapılan çalışma kapsamında, matematiksel bir model oluşturularak, denim kumaşların görüntülerini isabetli bir şekilde tahminleyebilmek mümkün olmuştur. Kıyaslanan görsellerden elde edilen sayısal verilere bakıldığında, oluşturulan yapay görüntülerle orijinal denim görüntüleri arasında görselin ortalama piksel değerlerinde ortalama

%94,2’lik, açık renkli piksellerde ortalama %91,8’lik, koyu renkli piksellerde ise ortalama %94,8’lik bir benzerlik başarısına ulaşılmıştır. Sayısal olarak yapılan bu kıyaslanmanın haricinde denim sektöründen 4 farklı uzman ile oluşturulan görsellerdeki benzerlik ve gerçekçilik görüşülmüş, uzmanlar tarafından da görsellerin benzerlik durumu teyit edilmiştir.

Bu haliyle geliştirilen model, koyu renkli çözümlükleri ve açık renkli atkılıklüklerini koyu ve açık pikseller olarak oluşturma yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, model üzerinde yapılacak yeni g¼ncellemelere yıkama, iplik boyama s¼reçleri parametreleri de dahil edilebilecektir. Bu ise piksellerin sadece koyu – açık şeklinde değil, denim kumaşın gerçek rengine oluşturulmasını sağlayabilecektir.

#### 4. DEĞERLENDİRMELER

Önerilen yöntemin tekstil end¼strisinde sağlayacağı faydalar, sektörde önemli bir dönüş¼m ve gelişim potansiyeli sunmaktadır. Tasarım ve üretim s¼reçlerindeki verimlilik artışı, öncelikle üretim öncesi fiziksel numunelerin yerini dijital ortamdaki numunelere bırakması, tasarım sürecinin hızlanmasını sağlayacaktır. Üretim parametrelerinin etkilerinin görsel olarak dijital ortamda sunulması, kullanıcıya deneme - yanılma s¼reçlerinin azaltılması avantajını sağlayacaktır. Bu durum, hem zaman ve kaynak tasarrufu sağlayarak rekabet gücünü artıracak hem de üretim maliyetlerini düş¼rerek ekonomik açıdan olumlu etki yapacaktır. Çalışma uzun vadede, sürdürülebilirlik ve çevresel faydalar açısından, azalan fiziksel numune üretimiyle hammadde ve enerji tasarrufu sağlanması, atık ve kirliliğin minimize edilmesi ve sürdürülebilir üretim ilkelerine uygun bir çalışma ortamı sunulmasına da katkı sağlayacaktır. Günümüzdeki sürdürülebilir kalkınma amaçları düşün¼ld¼đünde bunun kritik ve önemli bir katkı olduğu aşıkardır. Çalışmanın yine uzun vadede pazarlama ve satış alanında yapacağı katkı ise, sanal fuarlarda ve e-ticaret platformlarında 3D görsellerin sunulmasıyla müşteri deneyiminin iyileştirilmesi, artırılmış gerçeklik teknolojisiyle müşterilere ürünleri sanal ortamda deneme imkanı verilmesi ve kişiselleştirilmış ürün tasarımıyla yeni pazarlama modellerinin geliştirilmesi gibi avantajlar olarak düşün¼lmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen bu model, tekstil end¼strisinde çeşitli alanlarda önemli bir rol oynayabilecek ve sektör¼n dijitalleşme sürecine sağlam bir adım atmasını sağlayabilecek bir potansiyele sahiptir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından, Orta Anadolu Ticaret ve Sanayi İşletmesi T.A.Ő. ve Erciyes

Üniversitesi iş birliğiyle TÜBİTAK:TEYDEB-1505, 5200006 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

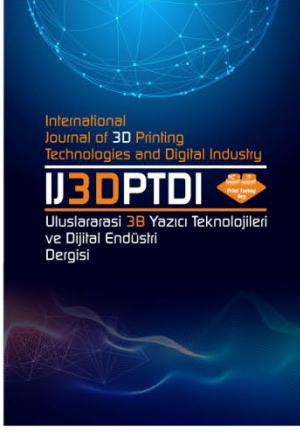
#### KAYNAKLAR

1. Paul, R., "Denim: manufacture, finishing and applications", Pages 1-3., Elsevier, 2015
2. Raina, M. A., Gloy, Y. S., & Gries, T., "Weaving technologies for manufacturing denim", Pages 159-187., Woodhead Publishing, 2015..
3. Kadi, N., & Karnoub, A., "The effect of warp and weft variables on fabric's shrinkage ratio", J Text Sci Eng, Vol. 5, Issue 1000191, 2015.
4. Çavan, R. B., "Indigo dye and reduction techniques", Pages 37-67., Woodhead Publishing, 2015.
5. Kurban, N. S., & Babaarslan, O., "S¼per streç denim kumaşların özelliklerine dair literat¼r incelemesi", Tekstil ve M¼hendis, Cilt 26, Sayı 113, Sayfa 104-115, 2019
6. Paul, R., "Denim and jeans: an overview", Pages 1-11, Elsevier, 2015.
7. Raina, M. A., Gloy, Y. S., & Gries, T., "Weaving technologies for manufacturing denim" Pages 159-187., Woodhead Publishing, 2015
8. Meng, S., Pan, R., Gao, W., Zhou, J., Wang, J., & He, W., "A multi-task and multi-scale convolutional neural network for automatic recognition of woven fabric pattern", Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 32, Issue 4, Pages 1147-1161, 2021.
9. Petrou, M. M., & Petrou, C., "Image processing: the fundamentals", John Wiley & Sons, 2010.
10. Baggio, D. L., "Mastering OpenCV with practical computer vision projects", Packt Publishing Ltd, 2012.
11. Sharath, D. M., Rohan, M. G., Kumar, S. A., & Prathap, C., "Disease Detection in Pomegranate using Image Processing", Pages 994-999., IEEE, 2020.
12. Beyeler, M., "OpenCV with Python blueprints", Packt Publishing Ltd, 2015.
13. Zhao, B., Meng, L., Yin, W., & Sigal, L., "Image generation from layout", 8584-8593., 2019.
14. Yildiz, K., řeny¼rek, V. Y., Yildiz, Z., & Özen, M. S., "A new approach to the determination of warp-weft densities in textile fabrics by using an image processing technique", Journal of Engineered

Fibers and Fabrics, Vol. 9, Issue 1, Pages 155892501400900101, 2014.

15. Babaarslan, O., Sarioğlu, E., Çelik, H. İ., & Avcı, M. A., "Denim fabrics woven with dual core-spun yarns", Engineered Fabrics, Pages 19-39, 2018.

16. Midha, V., & Mukhopadhyay, A., "Recent Trends in Traditional and Technical Textiles", 2021.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# PLA ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET FİLAMENTLERİNİN 3D FDM BASKIDA BOYUTSAL DOĞRULUK ve GERİÇEKİLME PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF DIMENSIONAL ACCURACY AND  
RETRACTION PERFORMANCE OF PLA AND  
RECYCLED PET FILAMENTS in 3D FDM PRINTING

**Yazarlar (Authors):** Elif AKTEPE , Şükriye AKTEPE 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aktepe E., Aktepe Ş., "Pla ve Geri Dönüştürülmüş Pet Filamentlerinin 3D FDM Baskıda Boyutsal Doğruluk Ve Geriçekilme Performansının Karşılaştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 114-123, (2024).



DOI: 10.46519/ij3dptdi.1400467

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>



# PLA ve GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PET FİLAMENTLERİNİN 3D FDM BASKIDA BOYUTSAL DOĞRULUK ve GERİÇEKİLME PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRILMASI

Elif AKTEPE<sup>a</sup> , Şükriye AKTEPE<sup>b</sup> 

<sup>a</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, TÜRKİYE  
<sup>b</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat ve Tasarım Anabilim Dalı, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [sukriyeaktepe@gmail.com](mailto:sukriyeaktepe@gmail.com)

(Geliş/Received: 05.12.23; Düzeltme/Revised: 26.01.24; Kabul/Accepted: 05.04.24)

## ÖZ

Bu çalışmada, PLA filament ve PET su şişelerinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen PET filamentin boyutsal doğruluğu ve geri çekilme performansı, 3D FDM (Fused Deposition Modeling) yazıcı kullanılarak üretilen test objeleri üzerinde değerlendirilmiştir. Çalışma, geri dönüştürülmüş PET filamentin kullanılabilirliğini ve teknik performansını belirlemeyi hedeflemektedir. Araştırmada farklı baskı hızları ile PLA filament ve geri dönüştürülmüş PET filament kullanılarak baskı işlemleri gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile farklı hızlarda (30-40-50 mm/s) üretilen test objelerinin boyutsal doğruluğu için ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler, filamentin yapısal tutarlılığını ve basılan nesnelerin boyutsal hassasiyetini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Geri çekilme performansı için de aynı baskı hızları kullanılarak hem PLA filament hem de geri dönüştürülmüş PET filament ile baskılar alınmıştır. Araştırmanın sonuçları, geri dönüştürülmüş PET filamentin 3 boyutlu FDM tipi yazıcılarda nasıl performans gösterdiğini ortaya koyarak, sürdürülebilir üretim sürecine katkıda bulunabilir.

**Anahtar Kelimeler:** 3 Boyutlu Yazıcı, Geri Dönüştürülmüş PET Filament, Boyutsal Doğruluk, Geri Çekilme Performansı

## COMPARISON OF DIMENSIONAL ACCURACY AND RETRACTION PERFORMANCE OF PLA AND RECYCLED PET FILAMENTS in 3D FDM PRINTING

### ABSTRACT

In this study, the dimensional accuracy and retraction performance of PET filament obtained through the recycling of PLA filament and PET water bottles were evaluated on test objects produced using a 3D FDM (Fused Deposition Modeling) printer. The aim of the study is to determine the usability and technical performance of recycled PET filament. Printing processes were carried out using different printing speeds with both PLA filament and recycled PET filament in the research. Measurements were taken for the dimensional accuracy of test objects produced at different speeds (30-40-50 mm/s) using a 3D printer. These measurements were conducted to assess the structural consistency of the filament and the dimensional precision of printed objects. Retraction performance was also evaluated by printing with both PLA filament and recycled PET filament at the same printing speeds. The results of the research can contribute to sustainable production processes by revealing how recycled PET filament performs in 3D FDM-type printers.

**Keywords:** 3D Printer, Recycled PET Filament, Dimensional Accuracy, Retraction Performance.

## 1. GİRİŞ

3 boyutlu yazıcı teknolojileri 1980'lerden bu yana hızla ilerlemiş ve ilerlemeye devam etmektedir. Endüstriyel ve prototip amaçlarıyla kullanılan bu teknolojiler, teknolojik ilerlemelerle birlikte daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale gelmiştir. Bu gelişme, 3 boyutlu yazıcı teknolojisinin geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesini ve çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır [1]. 3 boyutlu yazdırma veya eklemeli üretim, bilgisayar destekli program (CAD) kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda baskısı alınabilen modellerin bilgisayar ortamında oluşturulduğu bir süreçtir. Bu teknolojiler ile tasarımcılar, istedikleri nesneyi dijital olarak tasarlayabilir ve bu tasarımı 3 boyutlu bir model haline getirebilirler [2]. Farklı çalışma prensiplerinde 3 boyutlu yazıcılar mevcuttur. Yaygın olarak erimiş biriktirme modellemesi (FDM) kullanılmaktadır [3]. FDM yazdırma yöntemi, 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan bir üretim sürecidir. Bu süreç, 3 boyutlu bir nesnenin fiziksel modelini oluşturmak için bir CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımını kullanmasıyla başlamaktadır. Tasarımcı, tasarımın girdilerini kullanarak CAD modelini oluşturmaktadır. Sonrasında CAD modeli 3 boyutlu yazıcıların okuyabileceği bir dosya formatına dönüştürülmektedir. Bu dosya formatı genellikle STL, OBJ, AMF ve 3MF gibi formatlardır [4]. Dönüştürülen dosya, bir dilimleme yazılımı aracılığı ile işlenir. Slic3r, Cura ve Repetier gibi popüler açık kaynak dilimleme yazılımları bu adımda kullanılmaktadır [5]. Dilimleme yazılımı, yazdırılacak nesneyi katmanlara ayırır, katmanlar için yol oluşturur ve yazdırılacak nesneye destek yapıları ekler. Aynı zamanda tarama genişliği, tarama yönlendirmesi, dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve diğer yazıcı parametrelerini belirleyerek yazdırma işlemi için gerekli olan G-code'u oluşturmaktadır [6]. 3 boyutlu yazıcı, tasarlanan nesneyi yazdırmak için G-code talimatlarını takip etmektedir. Yazdırma işlemi, 3 boyutlu yazıcının ekstrüzyon başlığından çıkan erimiş malzemenin katmanlar halinde üst üste birleştirilmesiyle gerçekleşmektedir. Bu katmanlar, tasarlanan nesnenin 3 boyutlu modeline uygun şekilde bir araya getirilmektedir. Her bir katmanın üzerine eklenerek, nihai fiziksel modelin tabakalarını oluşturmaktadır. Bu süreç, malzemenin

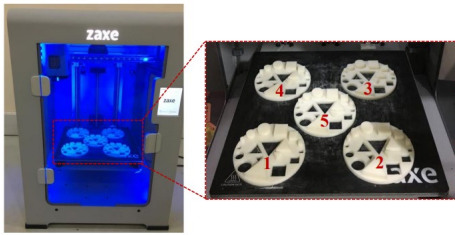
soğuması ve sertleşmesiyle birlikte ilerlemektedir. 3 boyutlu yazıcı G-code talimatlarını kullanarak, her adımda hangi konumda ve hangi özelliklere sahip olması gerektiğini belirlemektedir. Bu süreç, tasarlanan nesnenin dijital modelini gerçek bir fiziksel objeye dönüştürmek için hassas ve kontrollü bir üretim süreci sağlamaktadır [5].

3 boyutlu yazıcılar, termoplastik filament gibi malzemeleri kullanarak katman katman nesne üreten cihazlardır. ABS, PLA, PETG, Nylon gibi yaygın termoplastik filamentlerin yanı sıra, metal, ahşap ve karbon elyafı gibi daha egzotik malzemelerin kullanımı da mümkündür. Bu filamentler, farklı özelliklere sahip nesnelerin üretilmesini sağlamaktadır. 3 boyutlu yazdırma teknolojisi, birçok sektörde kullanılırken, sürekli olarak yeni malzemeler ve daha ileri seviye uygulamalar geliştirilmektedir. Böylece bu teknolojinin potansiyeli ve kullanım alanı genişlemeye devam etmektedir [7]. 3 boyutlu yazıcılarda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerin 3 boyutlu yazıcılarda kullanılması, çevresel etkiyi azaltarak sürdürülebilir üretim pratiklerine katkı sağlamaktadır. Ayrıca geri dönüştürülmüş malzemelerin 3 boyutlu yazıcılarda kullanılması üretim maliyetlerini düşürerek ekonomik açıdan da avantaj sunmaktadır [8].

3 boyutlu yazıcılarda üretim hızlı ve seri olmasına rağmen, objelerin boyutsal doğruluğu ve çapaklanmalar nedeniyle katmanlarda bozulmalar yaşanabilmektedir. Bu nedenle dijital tasarımların boyutsal doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Literatürde farklı malzemeler ve parametrelerle 3 boyutlu yazıcılarda üretilen nesnelerin performansını değerlendirmeye yönelik çalışmalar mevcuttur. ABS-plus malzemesiyle yapılan çalışmada; hızlı prototiplerde boyutsal doğruluk, düzlük ve yüzeysel dokusunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada FDM 3 boyutlu yazıcılardaki üretim süreçlerini optimize etmeye ve daha hassas sonuçlar elde etmeye yardımcı olmaktadır [9].

Endüstriyel 3 boyutlu yazıcı olan Zaxe Z1 yazıcısı kullanılarak ABS malzemenin üretilen parçalarda boyut hatalarını belirlemiştir. Farklı boyutlarda daire, kare ve eşkenar üçgen

şekilleri içeren test parçaları tasarlanmış ve imalat tablasının farklı bölgelerinde 5 farklı test parçası üretilmiştir. Baskısı alınan test objeleri Şekil 1'de görülmektedir. Baskıdan sonra taranan test parçalarının geometrileri iki boyutlu profiller olarak elde edilmiş ve geometri uydurma algoritmasıyla tasarlanan geometrilerle karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, profil tolerans değerlerinin imalat tablasındaki konuma ve geometriye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. İmal edilen tüm geometrilerin tasarlanan boyutlarından daha küçük olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, tüm geometriler çekmeye maruz kalmıştır. Genel olarak, geometri boyutu arttıkça profil tolerans değerinde artış gözlemlenmiştir. Tüm geometriler için ortalama profil tolerans değeri 0.1987 mm olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma da tarama yollarının kaydırılmasıyla daha hassas geometrilerin elde edilebileceğini göstermektedir [10].



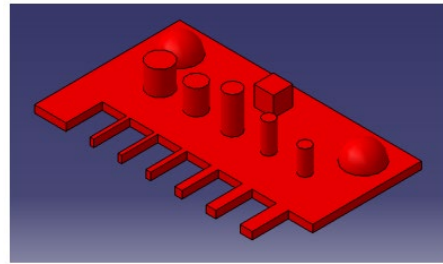
Şekil 1. Baskısı alınan test objeleri [10]

FDM yöntemiyle üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu inceleyen çalışmada Stratasys FDM 400MC makinesinde standart işlem parametreleri kullanılarak farklı boyutlardaki dört parça ABS malzemesiyle üretilmiştir. Üretilen test objesi Şekil 2'de görülmektedir. Koordinat Ölçme Makinesi ile ölçülen lineer boyutlarla parçaların boyutsal doğruluğu hesaplanmıştır. Parçaların boyutlarının FDM modelinin doğruluğunu önemli ölçüde etkilediğini ve dairesel şekilli parçaların, özellikle silindirik, küresel ve deliklerin, makinenin toleransı dışında olduğunu göstermektedir [11].



Şekil 2. FDM yazıcı kullanılarak baskı alınan test objesi [11]

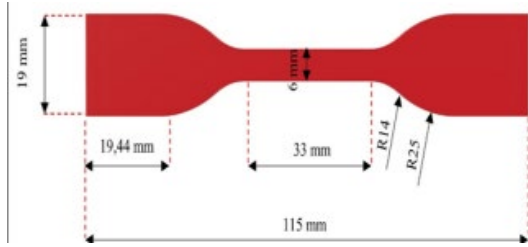
Hafsa vd. tarafından yapılan çalışmada, belirli bir parçanın üretimi için en uygun hızlı prototipleme ve imalat sürecini seçmenin zorluğuna odaklanmıştır. FDM yöntemiyle üretilen ABS ve PLA malzemeli parçalar Investment Casting süreci için ana model olarak değerlendirmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, içi boş ABS model düşük tabaka kalınlığı ile en iyi boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğüne sahipken, PLA modeli genel olarak daha iyi döküm sonuçları üretmektedir. Yüksek tabaka kalınlığıyla üretilen dolu PLA modeli, diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir [12]. Mendel Max ve Kossel Mini açık kaynaklı 3 boyutlu yazıcılarının etkinliğini ve doğruluğunu inceleyen bir çalışmada, Fused Filament Fabrication (FFF) kullanılan bu yazıcılar üzerinde yapılan testlerde, katman yüksekliği ve dolgu yoğunluğu gibi FFF parametreleri çeşitlendirilmiştir. Baskı için hazırlanan test objesinin modeli Şekil 3'te görülmektedir. PLA ve ABS filamentleri kullanılarak üretilen parçaların boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi ölçülmüştür. Sonuçlar, Mendel Max'in Kossel'e kıyasla daha düşük sapma gösterdiğini ve PLA filamentin daha iyi yüzey kalitesi sağladığını ortaya koymaktadır. Her iki yazıcı için de en iyi sonuçların, katman kalınlığı 0.178 mm ve dolgu yoğunluğu %20 olduğu durumlarda elde edildiği belirlenmiştir [13].



Şekil 3. Modellenen test objesi [13]

PLA malzemesinden yapılan parçaların boyutsal ve yüzey kalitesi, FFF kullanılarak değerlendirilmiştir. İşleme parametrelerinin, katman kalınlığı, baskı hızı ve sıcaklık gibi, parçaların özellikleri üzerindeki rolü incelemişlerdir. Ayrıca, titreşimli yüzey işleme (VSF) adlı bir post işleme operasyonunun, işlem süresinin parçaların yüzey ve boyutsal değişkenliği üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Katman kalınlığının hem doğrudan basılmış hem de post işlenmiş örneklerin yüzey ve boyutsal kalitesini kontrol etmek için önemli bir parametre olduğu bulunmuştur. Baskı sıcaklığı

ğının da örneklerin boyutsal doğruluğunda etkili olduğu görülmüştür. Post işleme düşünüldüğünde, üretilen örneklerin nihai yüzey kalitesini belirleyen kilit faktör süre olmuştur; post işlem ile yüzey pürüzlülüğü %66 oranında azalmıştır [14]. PLA, PET-G ve ABS malzemelerinden üretilen 3 boyutlu baskılı çekme test örneklerinin boyutsal doğruluğu üzerinde filament türü ve katman yüksekliğinin etkisi derinlemesine incelenmişlerdir. Üretilen test objesinin tasarımı ve boyutları Şekil 4'te görülmektedir. FFF teknolojisi temel alınarak, çeşitli katman yüksekliklerinde (0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm) çekme test örnekleri üretilmiş ve diğer baskı parametrelerini sabit tutulmuştur. Sadece nozül ve bina platformu sıcaklığı değiştirilmiştir. Üretilen test örneklerinin uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar, her bir örneğin boyutsal doğruluğunu gözlemek için tasarım boyutları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, örnekler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılarak nihai yüzey kaliteleri incelenmiştir. Boyutsal ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre, en doğru sonuçlar PET-G (uzunluk ve yükseklik) ve PLA (genişlik) örnekleri için kaydedilmiştir. Ayrıca, diğer filamentlere kıyasla PLA örneklerinde en iyi yüzey kalitesine ulaşılmıştır [15].



Şekil 4. Test objesinin tasarım ve boyutları [15]

Tezel yaptığı çalışmada ise eklemeli imalat yöntemi olan FDM ile PET-G malzemenin 5,10 ve 15 mm çapındaki içi boş ve dolu numuneler ürettiği. 3 boyutlu yazıcıda baskısı alınan numune Şekil 5'te görülmektedir. Farklı yazdırma sıcaklıklarında ve hızlarında baskısı alınan test objelerinin boyutsal doğrulukları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yazdırma sıcaklığının boyutsal doğruluğu etkilediğini göstermiştir [16].



Şekil 5. Baskısı alınan test objesi [16]

Islam ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, 3 boyutlu yazıcı ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğuyla ilgili önemli bir deneysel çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Parçaların doğruluğunu belirlemek amacıyla genel amaçlı bir koordinat ölçüm makinesi kullanılmıştır. Prizmatik parçalarda, 3 boyutlu baskı sürecinden kaynaklanan iki tür hata gözlemlenmiştir. Bu hatalar boyutsal değişiklikler ve delik çapındaki değişiklikler şeklindedir. Bu çalışma, 3 boyutlu baskı süreci ile ilişkilendirilen içsel boyut hataları üzerine önemli bir ön çalışma niteliğindedir [17]. PLA malzemesi ve FDM teknolojisi kullanılarak üretilen örneklerin 3 boyutlu baskı sürecindeki boyutsal doğruluğunu araştırılmıştır. Çeşitli işlem parametreleri, yapı yönlendirmesi, raster yönlendirme açısı ve katman kalınlığı gibi faktörler üzerindeki etkiler incelenmiştir. Beyaz, gri ve siyah PLA filamentleri kullanılarak silindirik ve köpek kemiği çekme test örnekleri üretilmiştir. Çalışma, en iyi sonuçları elde etmek için optimum işlem parametrelerini belirlemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ticari FDM 3D yazıcılarıyla yüksek bir genel boyutsal doğruluk %98,81 elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca, filament renginin test parçalarının ağırlığı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu ve katman kalınlığı parametresinin doğruluk üzerinde önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, termoplastik filamentlerle FDM 3 boyutlu baskı kullanarak parça üretimini optimize etmek için rehberlik edebilecek önemli konfigürasyonları tanımlamaya yardımcı olmaktadır [18].

Kechagias vd. tarafından yapılan çalışmada, Polyjet Direct 3 boyutlu baskı süreci ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu etkileyen parametreleri incelenmiştir. Katman kalınlığı, inşa stili ve model ölçeği üzerinde dört deney gerçekleştirilmiştir. 0.01 mm hassasiyetinde dijital mikrometre ile lineer ve diyametrik boyutlar ölçülmüştür. ANOM diyagramları ile her parametrenin etkisi belirlenmiştir, performans ölçütlerine göre optimum seviyeler önerilmiştir. ANOVA analizi ile parametrelerin

performans üzerindeki etkisi yüzde olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, dış boyutların bıçak hareketi ve katman kalınlığından etkilendiğini, iç boyutların ise katman kalınlığı ve ölçek faktöründen öncelikli olarak etkilendiğini göstermiştir [19].

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere PET su şişelerinden üretilen filament ve ham olarak piyasada satılan PLA malzemesiyle boyutsal doğruluk ve geri çekilme için üç farklı hızda baskı alınmıştır. GD-PET 3 boyutlu yazıcıda kullanılabilirliği PLA filament ile kıyaslanmıştır. PLA ve geri dönüştürülerek üretilmiş PET filamentin yazdırma hızının boyutsal doğruluğa ve geri çekilmeyle olan ilişkisi deneysel olarak incelenmiştir.

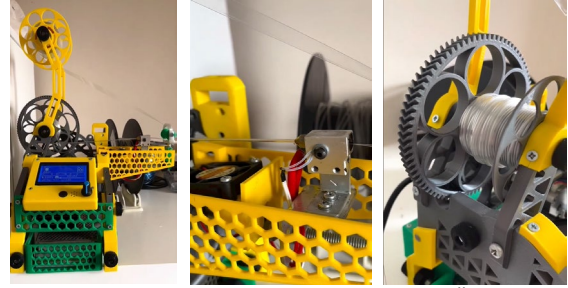
## 2. MATERYAL VE METOT

Günümüzde, küresel ölçekte kullanılan plastiklerin %88'i, çeşitli zararlı yöntemlerle imha edilmektedir. Bu yöntemler ya toprağın altına gömülmesi ya da yakılarak çevreye zararlı gazlar sızmaktadır. Bu endişe verici durum, her yıl dünya genelinde üretilen 260 milyon ton plastik atığın sadece %12'sinin geri dönüştürülebildiği anlamına gelmektedir. Bu büyük orandaki plastik atıkların etkisiz bir şekilde yönetilmesi, çevre kirliliği, ekosistem zararı ve sürdürülebilir kaynak kullanımı konularında ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, plastik atıkların daha sürdürülebilir ve etkili bir şekilde geri dönüştürülmesine yönelik çözümler bulunması, küresel çevre sorunlarına karşı önemli bir adımdır [20].

PET, su şişeleri, gıda ambalajları ve tekstil ürünleri gibi çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimer reçine türüdür. PET, neme ve kimyasallara dayanıklı, güçlü ve hafif bir malzemedir ve genellikle plastik şişe üretiminde tercih edilmektedir. Şeffaf ve kristal berraklığına sahip olan PET filament, ısıtıldığında veya çeşitli işlemlere tabi tutulduğunda şeffaflığını değiştirebilmektedir [21].

PET, hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşüm işlemleriyle geri dönüştürülebilen bir polimerdir. Mekanik geri dönüşümde, kullanılmış PET malzemesi temizlenip kurutulduktan sonra granül haline getirilmekte ve eritilerek yeni PET filament elde edilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm ise PET

malzemeyi kimyasal bileşenlerine ayırarak, bu bileşenleri yeni malzemeler oluşturmak için kullanmayı içermektedir. Ancak, PET malzemenin geri dönüşümü, yavaş üretim oranları ve yüksek maliyetli süreçler gibi bazı dezavantajları içermektedir. Bu nedenle, belirli bir geri dönüşüm programının özel ihtiyaçları ve hedefleri göz önüne alınarak uygun geri dönüşüm yöntemlerinin seçilmesi önemlidir. Çalışma, 5 ve 10 litrelik PET su şişelerinin kullanıldığı bir deneyi içermektedir. Atık olan kullanılmış PET su şişeleri, ilk olarak dış jelatinlerinden arındırılarak ve dış yüzeyleri pürüzsüz ve düzgün bir hale getirilmektedir. Daha sonra, sabit bir jilet ile tutarlı bir şekilde, silindirik olan PET su şişesi döndürülerek şerit şeklinde kesilmektedir. Elde edilen dikdörtgen kesitli şerit daha sonra geçiş bölgesinden ısıtılmış alanda geçerek 1.75 mm çapında filament elde edilmiştir. PET su şişeden filament üretimi için kullanılan makine görselleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. PET Su Şişesinden Filament Üretim Makinası

Geri dönüştürülmüş PET, plastik atıkların geri kazanımı ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla üretilen bir malzemedir. PET, çeşitli içecek şişelerin, plastik kaplar ve ambalaj malzemeleri gibi çok yaygın bir plastik türüdür. Bu nedenle geri dönüştürülmüş PET, plastik atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Çalışmada atık PET su şişelerinden üretilen PET filament ile hazır olarak satın alınan PLA filament kullanılmıştır. Test objelerinin baskısında Creality marka Ender 3 pro üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır.

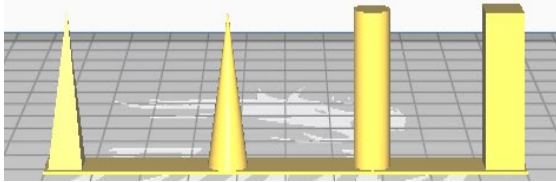
Boyutsal doğruluk testi için 6 farklı boyuttan oluşan kule modeli baskısı alınmıştır. Kule modeli Jay Dhariwall'in Fab Academy 2019 web sitesindeki bireysel ödev için, yapılan çalışmalar referans alınmıştır [22]. Kule modelin tabandan tepeye doğru çapları sırasıyla

25, 20, 15, 10, 5 ve 2.5 mm olarak düzenlenmiştir. Test objesinin yüksekliği ise 30 mm'dir. Şekil 7'de hazırlanan model verilmiştir.



Şekil 7. Boyutsal Doğruluk Test Objesi.

Geri çekilme performansını ölçmek için 100 mm uzunluğunda 10 mm genişliğinde 1 mm kalınlığında dikdörtgen prizma üzerine eşit aralıklar ile dört farklı geometriye sahip dikdörtgen prizma, silindir, konik ve üçgen prizmadan oluşan test objesi hazırlanmıştır. Bu model tasarlanırken Jay Dhariwall'in Fab Academy 2019 web sitesindeki bireysel ödev için, yapılan çalışmalar referans alınmıştır [22], web sitesindeki model üzerinde aynı geometrik şekiller kullanılmıştır. Bu çalışmada geometrik şekiller değiştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcının farklı şekiller arasında geçiş yaparken geri çekilme performansı değerlendirilmiştir. Test objesinin toplam yüksekliği 31 mm'dir. Şekil 8'de hazırlanan model verilmiştir.



Şekil 8. Geri Çekilme Performansı Test Objesi.

Çalışmada dilimleme programı olarak CURA kullanılmıştır. Test objelerinin tamamında katman kalınlığı 0.2 mm olarak sabit tutulmuştur. Test objeleri 30 mm/s, 40 mm/s ve 50 mm/s yazdırma hızlarında 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Dolgu yoğunluğu bütün objelerde %10 olarak sabit tutulmuş ve dolgu şekli kübik olarak belirlenmiştir.

Geri dönüştürülmüş PET filament için yazdırma parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Baskı hızı haricindeki diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. GD-PET Filament Yazdırma Parametreleri.

Parametreler	Değer
Baskı Hızı (mm/s)	30, 40, 50
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Dolgu Yoğunluğu (%)	10
Dolgu Şekli	Kübik
Nozül Sıcaklığı (°C)	260
Yatak Sıcaklığı (°C)	85
Fan Hızı (%)	100

PLA filament için yazdırma parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Baskı hızı haricindeki diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Çizelge 2. PLA Filament Yazdırma Parametreleri.

Parametreler	Değer
Baskı Hızı (mm/s)	30, 40, 50
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Dolgu Yoğunluğu (%)	10
Dolgu Şekli	Kübik
Nozül Sıcaklığı (°C)	210
Yatak Sıcaklığı (°C)	65
Fan Hızı (%)	100

PLA ve GD-PET filament yazdırma parametrelerinden sadece nozül ve yatak sıcaklığı farklıdır. PLA filament için 65 °C yatak sıcaklığı, 210 °C nozül sıcaklığı, GD-PET filament için 85 °C yatak sıcaklığı, 260 °C nozül sıcaklığında baskı alınmıştır.

Üretilen test objelerinin boyutsal doğruluğu Carbon Fiber Composites Digital Caliper kullanılarak ölçülmüştür. Kumpas Şekil 9'da verilmiştir.



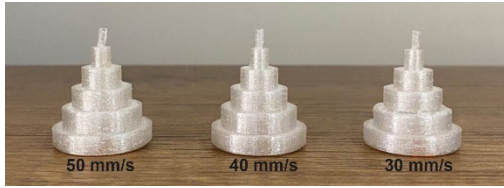
Şekil 9. Ölçüm için Kullanılan Kumpas.

Boyutsal doğruluk testi için üretilen objelerin ölçümleri her katman için tek tek yapıp kaydedilmiştir. Geri çekilme performansının gözlemlenebilmesi için test objelerine baskı sonrasında hiçbir işlem uygulanmamıştır.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

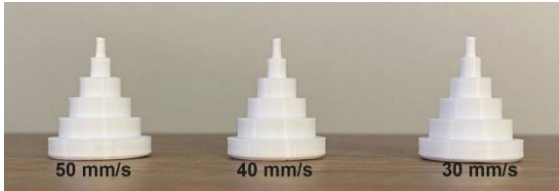
GD-PET filament kullanılarak üç farklı hızda test objesi üretilmiştir. Baskısı alınan test objelerinin görseli Şekil 10'da gösterilmiştir. Test objelerinin CAD çapları ve 3 boyutlu yazıcıdan baskı alındıktan sonraki ölçümleri

Çizelge 3 ve 4’te verilmiştir. En önemli fark 50 -40 mm/s hızda üretilen objenin son katmanında sırasıyla %47 ve %38 olarak belirlenmiştir. Yazdırma işleminde boyutun küçük olmasından dolayı yapışma sorunu gözlemlenmiştir. Son katman dikkate alınmadığında CAD boyutuna yakın rakamlar kaydedilmiştir. Ancak genel olarak CAD boyutunun birebir aynısı olmadığı tespit edilmiştir. Üretilen test objelerinde yazdırma hızı arttıkça boyutsal doğrulukta düşüş gözlemlenmiştir. Bu yüksek hızda yapılan baskılarda filamentin daha hızlı soğuyarak, katılaşmasının tam ve düzgün olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ölçülen değerler Çizelge 3’te verilmiştir.



**Şekil 10.** GD-PET Filament Boyutsal Doğruluk Test Objeleri.

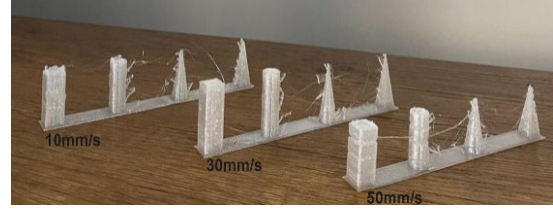
PLA filament ile üretilen test objeleri de üç farklı hızda üretilmiştir. Baskısı alınan test objelerinin görselleri Şekil 11’de gösterilmiştir. Test objelerinin CAD çapları ve 3 boyutlu yazıcıdan baskı alındıktan sonraki ölçümleri Çizelge 4’te gösterilmiştir. Ölçülen değerler incelendiğinde 30 mm/s hızda üretilen test objesinin 10, 15, 20 ve 25 mm çaplı kısımlarında CAD çizimiyle aynı değerler ölçülmüş, 2.5 ve 5 mm çaplı kısımlarda ise CAD çizimine oldukça yakın değerler ölçülmüştür. 50 mm/s hızda baskı alınan objenin son katmanında %25 oranında en büyük fark ölçülmüştür. GD-PET filamentle üretilen test objelerinde olduğu gibi PLA filament ile üretilen test objelerinde de baskı hızı arttıkça boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir.



**Şekil 11.** PLA Filament Boyutsal Doğruluk Test Objeleri.

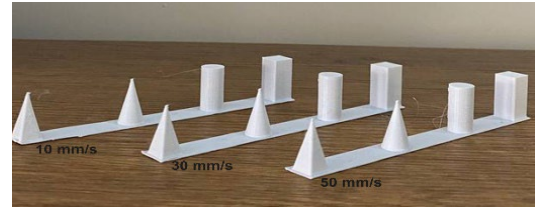
Geri çekilme performansının incelenmesi için GD-PET filament ile baskı alınan test objeleri Şekil 12’de gösterilmiştir. Üç farklı hızda baskı alınan objeler incelendiğinde baskı hızı arttıkça

geri çekilme performansının düştüğü tespit edilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda baskı alınan test objelerinde, özellikle 50 mm/s hızda baskıda, nozül ucundaki malzemeden sızmalar oluşmuştur ve bu durum baskıda iplik veya saçak oluşumuna yol açmıştır. 30 mm/s hızda sızma oluşumu azalmıştır ancak tamamen kusursuz baskı alınmamıştır. Bu durumun nedeni ise baskı sıcaklığı olabileceği düşünülmektedir. GD-PET filamentin yüksek sıcaklıkta eridiği ve baskı esnasında akmalarn fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 260 °C’nin altında baskı alınması denenmiş fakat baskı esnasında nozül de tıkanmalar görülmüştür.



**Şekil 12.** GD-PET Filament Geri Çekilme Performansı Test Objeleri.

PLA filament ile geri çekilme performansı için test objeleri baskısı alınmıştır. Baskı alınan objeler Şekil 13’te verilmiştir. PLA filamentinin önerilen sıcaklıkta 210 °C’de baskı alınmıştır. Baskı hızı 50 mm/s olan baskılarda çok az baskı geçişlerinde kılçıklanma gözlemlenmiştir.



**Şekil 13.** PLA Filament Geri Çekilme Performansı Test Objeleri.

#### 4. SONUÇLAR

GD-PET filament ile üretilen ve PLA filament kullanılarak üretilen objelerin testlerinde, baskı hızının artmasıyla boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir. GD-PET ve PLA filament kullanılarak alınan baskılarda, yüksek hızda üretilen objelerin son katmanlarında büyük boyut farkları tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek baskı hızının filamentin daha hızlı soğuyarak tam katılaşmamasına neden olmasıyla açıklanabilmektedir. Her iki filament türüyle de yapılan baskılarda, genel olarak CAD boyutlarına yakın değerler kaydedilmiştir.

Boyutsal doğruluk testi için referans alınan çalışma ile kıyaslandığında, baskı alınan modellerin çapları küçüldüğünde, büyük olan ile kıyaslandığında baskılarda deformasyonların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle yüksek baskı hızlarında, malzemenin istenen formu tam olarak alamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle, baskı hızının boyutsal doğruluk üzerindeki etkisi dikkate alınarak optimal parametrelerin belirlenmesi önemli olacaktır.

Geri çekilme performansı GD-PET filament ile PLA filament arasında kıyaslandığında, aynı hızda yapılan baskılarda GD-PET filamentte kılçıklanmanın daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. GD-PET filament, PET plastikten üretilir ve PLA filamentten farklı termal özelliklere sahiptir. Bu nedenle, GD-PET filamentin baskı sırasında daha yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelmesi ve daha düşük sıcaklıklarda hızla katılaşmaktadır. Kılçıklanma, filamentin yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelip daha düşük sıcaklıklarda hızla katılaşması sonucu oluşmaktadır.

Boyutsal doğruluğun ötesinde, GD-PET filamentin kılçıklanma eğilimi, özellikle yüksek hızlarda belirginleşmiştir. Kılçıklanmanın azaltılması için sıcaklık ayarlarının titizlikle kontrol edilmesi ve baskı parametrelerinin dikkatlice ayarlanması önemlidir. Bu bağlamda, malzemenin termal özelliklerini anlamak ve buna göre baskı ayarlarını optimize etmek, daha sağlam ve istikrarlı sonuçlar elde etmek adına kritik bir adım olacaktır.

Yapılan testlerde GD-PET filament ile üretilen test objelerinde ve PLA filament kullanılarak yapılan testlerde, baskı hızının artmasıyla boyutsal doğrulukta düşmeler gözlemlenmiştir. Hem GD-PET filamentle yapılan baskılarda hem de PLA filament ile yapılan baskılarda, yüksek hızda üretilen objelerin son katmanlarında büyük boyut farkları tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek baskı hızının

filamentin daha hızlı soğuyarak tam katılaşmamasına neden olmasıyla açıklanabilmektedir.

Sonuç olarak, baskı kalitesini arttırmak ve boyutsal doğruluğu yükseltmek için baskı parametrelerinin titizlikle ayarlanması önemlidir. Her iki filament türüyle de yapılan baskılarda, baskı hızı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, istenilen sonuçları elde etmek için gereklidir. Deneme yanılma yöntemiyle filamentlerin özelliklerini ve uygun baskı ayarlarını belirlemek, kaliteli ve hassas 3 boyutlu baskılar elde etmek için önemli bir adımdır.

Gelecek çalışmalarda, GD-PET filament, tasarım objeleri için kullanımı daha uygun olabilecek bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Ancak herhangi bir makinanın yedek parça baskısında kullanımı sırasında potansiyel zorluklar ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Bu zorluklar, malzemenin mukavemeti, dayanıklılığı ve uzun vadeli performansı ile ilgili olabilir. Bu nedenle, yedek parça üretiminde kullanılmadan önce malzemenin özellikleri dikkatlice gözden geçirilmeli ve gerekirse alternatif malzemeler de değerlendirilmelidir. Ayrıca, baskı ayarlarının doğru bir şekilde yapılandırılması ve tasarımın malzemenin özelliklerine uygun olarak düzenlenmesi, olası sorunların minimize edilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma, GD-PET filament ve PLA filament kullanılarak yapılan 3D baskıların boyutsal doğruluğu ve malzeme performansı üzerindeki etkilerini anlamak adına önemli bilgiler sunmaktadır. Yüksek baskı hızlarının ve farklı filament türlerinin boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesine olan etkileri üzerindeki bu detaylı inceleme, endüstriyel ve hobi amaçlı 3D baskı uygulamalarında kullanıcıların daha bilinçli seçimler yapmalarına yardımcı olabileceği düşünülmektedir.



**Çizelge 3.** GD-PET Filament ile Üretilmiş Boyutsal Doğruluk Objelerinin Ölçümleri.

CAD Çapı (mm)	50 hız ile 3			40 hız ile 3			30 hız ile 3		
	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)
2.5	1.7	0.8	47.0	1.8	0.7	38.8	1.9	0.6	31.5
5	4.4	0.6	13.6	4.5	0.5	11.1	4.8	0.2	4.1
10	9.5	0.5	5.2	9.7	0.3	3.0	9.8	0.2	2.0
15	14.5	0.5	3.4	14.7	0.3	2.0	14.8	0.2	1.3
20	19.4	0.6	3.0	19.6	0.4	2.0	19.8	0.2	1.0
25	24.5	0.5	2.0	24.6	0.4	1.6	24.6	0.4	1.6

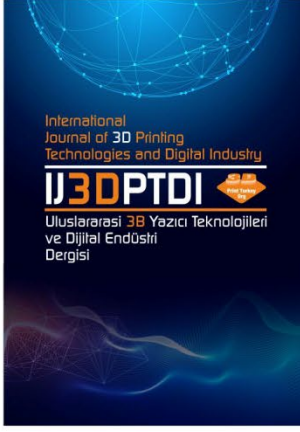
**Çizelge 4.** PLA Filament ile Üretilmiş Boyutsal Doğruluk Objelerinin Ölçümleri.

CAD Çapı (mm)	50 hız ile 3			40 hız ile 3			30 hız ile 3		
	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)	Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)
2.5	2	0.5	25	2.3	0.2	8.6	2.4	0.1	4.1
5	4.7	0.3	6.3	4.8	0.2	4.1	4.9	0.1	2.0
10	9.8	0.2	2.0	9.9	0.1	1.0	10	0	0
15	14.9	0.1	0.6	14.9	0.1	0.6	15	0	0
20	19.8	0.2	1.0	19.8	0.2	1.0	20	0	0
25	24.9	0.1	0.4	24.9	0.1	0.4	25	0	0

## KAYNAKLAR

- Horvath J, Horvath J. "A brief history of 3D printing". Mastering 3D Printing, Pages 3-10, 2014.
- Lee D, Miyoshi T, Takaya Y, Ha T, "3D Micro fabrication of Photosensitive Resin Reinforced with Ceramic Nanoparticles Using LCD Microstereolithography". Journal of Laser Micro/Nano engineering Vol. 1, Issue 2, 2006.
- Gokhare V. G, Raut D. N, Shinde D. K, "A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing". Int. J. Eng. Res. Technol, Vol. 6, Issue 6, Pages 953-958, 2017.
- Qin Y, Qi Q, Scott P. J, Jiang X. "Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data". Computer-Aided Design, Vol. 111, Pages 44-64, 2019.
- Gokhare V. G, Raut D. N, Shinde D. K, "A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing". Int. J. Eng. Res. Technol, Vol. 6, Issue 6, Pages 953-958, 2017.
- Karman M, Saxena A, "A comprehensive study on 3D printing technology". MIT Int J Mech Eng, Vol. 6, Issue 2, 63-69, 2016.
- Dave H.K, Patel S.T, "Introduction to Fused Deposition Modeling Based 3D Printing Process". Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Pages 1-21, 2021.
- Filamentlerin Detaylı Karşılaştırılması, <https://artiboyut.com/2023/10/21/filamentlerin-detayli-karsilastirilmasi-2/>, Kasım 5, 2023.
- Nuñez P.J, Rivas A, García-Plaza, E, Beamud E, Sanz-Lobera A, "Dimensional and surface texture characterization in fused deposition modelling (FDM) with ABS plus". Procedia Engineering, Vol. 132, Pages 856-863, 2015.
- Kıran K, Şekerci B, Urgancı K. B, Delikanlı Y. E, Gezgen B, "Endüstriyel bir 3 boyutlu yazıcı ile imal edilen ABS malzemeli parçaların boyut hatalarının incelenmesi". Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 12, Sayı 4, Sayfa 1046-1057, 2022.
- Sudin M.N, Shamsudin S.A, Abdullah M.A, "Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model". APRN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, Pages 8067-8072, 2016.

12. Hafsa M.N, Ibrahim M, Wahab M.S, Zahid M.S, “Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material”. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 465, Pages 55-59, 2014.
13. Ramli, F. R., Faudzie, M. S. M., Nazan, M. A., Alkahari, M. R., Sudin, M. N., Mat, S., & Khalil, S. N. “Dimensional accuracy and surface roughness of part features manufactured by open source 3D printer”. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*, Vol. 13, Issue 3, Pages 1139-1144, 2018.
14. Taşcıoğlu, E., Kıtay, Ö., Keskin, A. Ö., & Kaynak, Y.”Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, Issue 4, Pages 139, 2022.
15. Bolat, Ç., & Ergene, B. “An investigation on dimensional accuracy of 3D printed PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights”. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Vol. 37, Issue 2, Pages 449-458, 2022.
16. Tezel T, “FDM ile Üretilen PET-G Malzemenin Üretim Sıcaklığı ve Hızının Boyutsal Doğruluğa Etkisi”. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, Vol. 3, Issue 2, Pages 82-8, 2019.
17. Islam, M. N., Boswell, B., & Pramanik, A. “An investigation of dimensional accuracy of parts produced by three-dimensional printing”. In *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013*, Pages 522-525, IAENG, 2013.
18. Hanon, M. M., Zsidai, L., & Ma, Q. “Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 42, Pages 3089-3096, 2021.
19. Kechagias, J. P. A. I., Stavropoulos, P., Koutsomichalis, A., Ntintakis, I., & Vaxevanidis, N. “Dimensional accuracy optimization of prototypes produced by PolyJet direct 3D printing technology”. *Adv. Eng. Mech. Mater*, Vol. 978, Pages 61-65 2019.
20. What if we realised the true value of plastic?, <https://recyclingtechnologies.co.uk/>, Kasım 12, 2023.
21. Bartolome, L., Imran, M., Cho, B. G., Al-Masry, W. A., & Kim, D. H. “Recent developments in the chemical recycling of PET”. *Material recycling-trends and perspectives*, Vol. 406, Pages 576-596, 2012.
- 22.3D Printing and Scanning, <https://fabacademy.org/2019/labs/akgec/students/jay-dhariwal/assignments/week06/>, Ekim 10, 2023.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## PRODUCTION OF Ni-HARD ALLOY POWDERS BY GAS ATOMIZATION

**Yazarlar (Authors):** Onur MURATAL<sup>ID\*</sup>, Ridvan YAMANOĞLU<sup>ID</sup>, Can DURAN<sup>ID</sup>, Yiğit GÖNÜLALAN<sup>ID</sup>, Yağız AKYILDIZ<sup>ID</sup>, Funda GÜL KOÇ<sup>ID</sup>, Burak BARUTÇUOĞLU<sup>ID</sup>,

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Muratal O., Yamanoğlu R., Duran C., Gönülalan Y., Akyıldız Y., Gül Koç F., Barutçuoğlu B., "Production of Ni-Hard Alloy Powders By Gas Atomization" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 124-129, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1402760

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# PRODUCTION OF Ni-HARD ALLOY POWDERS BY GAS ATOMIZATION

Onur MURATAL<sup>a,b</sup><sup>\*</sup>, Ridvan YAMANOĞLU<sup>a</sup>, Can DURAN<sup>a</sup>, Yiğit GÖNÜLALAN<sup>a</sup>, Yağız AKYILDIZ<sup>a,c</sup>, Funda GÜL KOÇ<sup>a</sup>, Burak BARUTÇUOĞLU<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup>Kocaeli University, Engineering Faculty, Metallurgy and Materials Department, TURKEY

<sup>b</sup>TOYOTETSU OTOMOTIV, TURKEY

<sup>c</sup>ALPOMET, TURKEY

<sup>d</sup>ONATUS Öngörü Teknolojileri, TURKEY

\*Corresponding Author: [onurmural@gmail.com](mailto:onurmural@gmail.com)

(Received: 10.12.24; Revised: 14.03.24; Accepted: 06.04.24)

---

## ABSTRACT

Ni-Hard cast iron materials are frequently used in equipment where high wear resistance is required in industrial applications. Generally, Ni-Hard is produced by conventional casting techniques. In this study, it was aimed to produce Ni-Hard powders to produce Ni-Hard cast iron materials with additive manufacturing techniques. To produce spherical and fine raw materials for additive manufacturing techniques, the gas atomization technique with a close-coupled nozzle system was preferred for the production of Ni-Hard powders. Ni-Hard alloy was melted in a high-frequency 10kW induction furnace under a protective atmosphere integrated into the gas atomization system. During the atomization process, 150 °C superheating was applied to prevent the liquid metal from freezing and clogging the melt delivery tube. In terms of the continuity of the atomization process, the negative pressure (aspiration pressure) values formed at the end of the melt delivery tube at different gas pressures were measured. An aspiration pressure of -50 mbar was obtained under an atomization pressure of 35 bar. Particle size distributions, hall flow behaviour and angle of repose properties of the produced powders were determined. Finally, the characterization of the powders was carried out by scanning electron microscopy. It was determined that the powders obtained as a result of atomization exhibited a spherical morphology and a narrow size range. The Hall flow rate test result of Ni-Hard powders was measured as 22 seconds for 50 g.

**Keywords:** Gas Atomization, Additive Manufacturing, Ni-Hard, Powder Characterization.

---

## 1. INTRODUCTION

Cast irons are the alloy group with the highest production capacity in the parts produced with the casting technique, which is one of the traditional production methods. Cast irons are generally Iron-Carbon-Silicon alloys with high hardness and high wear resistance. It has been classified in various ranges and properties according to its alloying elements in cast irons. The existing wear resistance and mechanical properties of high alloy white cast irons can be improved by the addition of carbide-forming elements (Nb, Mo, W, Cr, V, Ti) and a suitable heat treatment process [1]. High-alloyed white cast irons are widely used in the mining, cement, machinery and construction industries, as they have high wear resistance. Ni-Cr alloy

white cast irons are called Ni-Hard alloys. High chromium white cast irons can form  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$  and  $M_3C$  type carbides depending on their chemical composition [2], [3]. Ni-Hard alloys are also used as the final piece after sintering. In addition, in the industry, coating with Ni-Hard is made to extend the performance and life of cutting and drilling tools. In the past, traditional coating methods such as nitriding, carburizing and electroplating were preferred in the industry. However, with the developing technology, thin film PVD and CVD coating techniques and thick coating thermal spray, laser cladding techniques appear. It has been determined that the corrosion resistance of the parts has improved in the coatings made with various alloying elements added to the Ni-Hard

alloys [4]. Ni-Hard white cast irons are called Ni-Hard 1, Ni-Hard 2 and Ni-Hard 4 cast irons. Considering this classification, Ni-Hard 4 alloy has higher wear resistance and toughness strength than Ni-Hard 1 and Ni-Hard 2 alloys. For this reason, Ni-Hard 4 alloys are frequently used, especially in places where high wear resistance is required [5]. Although casting is the widely used production technique of high alloy cast irons, powder metallurgy is also a very advantageous method in producing this alloy. Despite the traditional production methods of powder metallurgy, no defects negatively affect mechanical properties such as gas voids and splitting [6]. Complex parts that casting methods cannot produce can be produced by powder metallurgical methods such as hot press (HP), hot isostatic press (HIP), laser cladding, flame spray process and additive manufacturing (AM). Especially in recent years, the need for raw materials for additive manufacturing technologies, the development of coating technologies and the use of powder as raw material have allowed atomization methods to be preferred more [7]. The powders to be used are expected to have high fluidity and different particle size distributions required according to the method. In this respect, although there are many different powder production techniques (mechanical, chemical and atomization techniques), especially gas atomization techniques are ahead of other powder production techniques. The gas atomization technique can be expressed as a conventional powder production technique for metal powder production. The fact that many different parameters take place in the gas atomization production processes, which is based on the principle of molten liquid metal flowing through a nozzle and breaking it down with different gases (air, nitrogen, argon and helium), allows the economical production of powders needed by various sectors [8-9]. In this study, Ni-Hard alloy powders were produced by gas atomization technique. The powders produced were characterized in detail.

## 2. MATERIAL AND METHOD

The chemical compositions of Ni-Hard (white cast) alloys, which are frequently preferred in industrial applications, are given in Table 1. Ni-Hard 4 alloy was atomized with the gas atomization system in Kocaeli University Metallurgical and Materials Engineering Department. Gas atomization system consists of

a nozzle, induction melting device and gas systems. To reduce the amount of ambient oxygen before production, the chamber and the melting system were recirculated with argon gas. The image of the gas atomization system used in the studies is shown in Figure 1.

**Table 1.** Chemical composition of Ni-Hard alloys.

Alloy Code	Ni-Hard 1	Ni-Hard 2	Ni-Hard 3	Ni-Hard 4
C	3.0-3.6	3.0-3.6	3.0-3.6	3.0-3.6
Si	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5	0.3-0.5
Mn	0.3-0.7	0.3-0.7	0.3-0.7	0.3-0.7
S	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.15
P	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30
Ni	3.3-4.8	3.3-4.8	3.3-4.8	3.3-4.8
Cr	1.5-2.6	1.5-2.6	1.5-2.6	1.5-2.6
Mo	0-0.4	0-0.4	0-0.4	0-0.4



**Figure 1.** Gas atomization system used during experimental studies.

The gas atomization system chamber is made of 304 quality stainless steel. After the raw materials were melted in the induction furnace, they were atomized with high pressure gases in the chamber. The induction melting furnace has a capacity of 3 kg. S type thermocouple was used to measure the temperature during melting. High-purity nitrogen gas was used to atomize the liquid metal. The atomization process was carried out at 35 bar by using a 0-50 bar pressure reducing regulator. A closed couple type nozzle was used during atomization processes. A

ceramic melt delivery tube with a 4.5 mm hole diameter was selected to ensure liquid metal flow through the tundish. In order to ensure the continuity of the atomization process and prevent clogging, the pressure formation values at the end of the melt distribution tube were measured using a digital pressure difference meter (Testo 510i). The gas atomization parameters used in the study are given in Table 2. Within the scope of the study, firstly, high purity master alloy of Ni-Hard 4 alloy was prepared. During the preparation of the alloy, high purity pig iron and other alloying elements were melted separately.

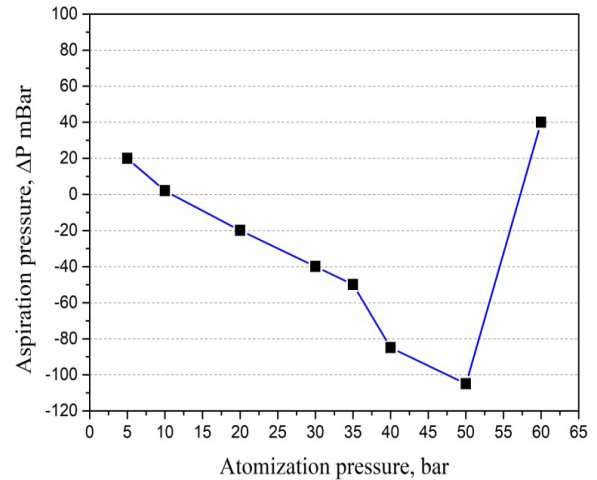
**Table 2.** Atomization parameters.

Alloy Code	Ni-Hard 4
Melting Temperature (°C)	1200-1250(T <sub>E</sub> ) + 150
Gas Pressure (Bar)	35
Melt Delivery Tube (mm)	4.5
Gas Type	Nitrogen

The size distribution of the powders was carried out by sieve analysis. The images of the powders were taken using the JEOL 6060 scanning electron microscope. Afterwards, to be able to comment on the sphericity and fluidity of the powders, the obtained powders were subjected to the hall flow test, and then the angle of repose were measured and the results were shared.

### 3. RESULTS

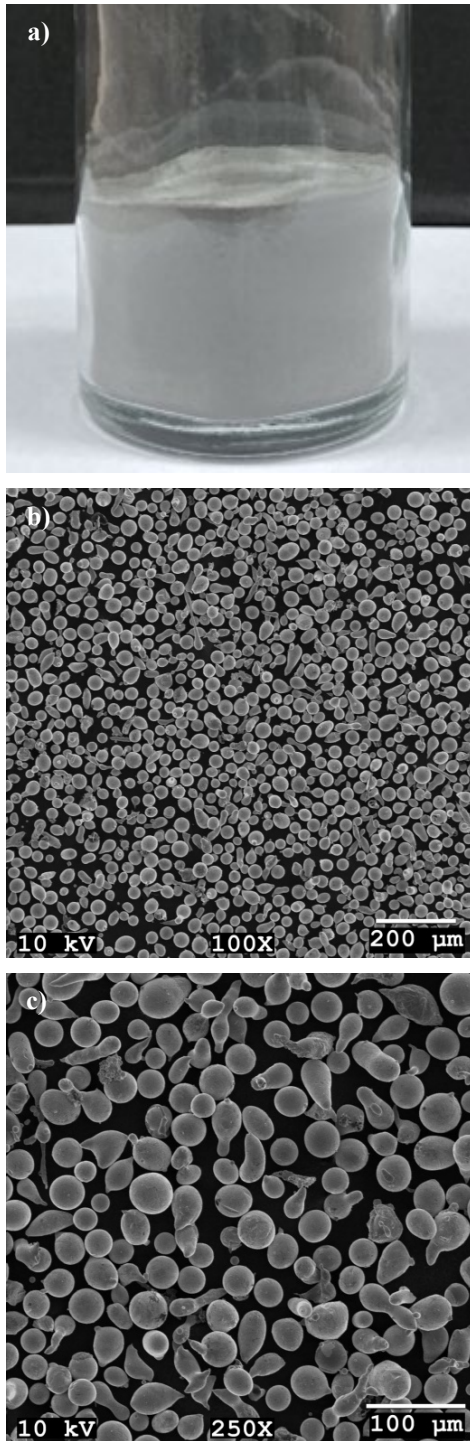
Positive pressure values formed at the end of the melt delivery tube prevent the liquid metal from flowing through the pipe under the force of gravity, causing the liquid metal to be pushed back into the melt delivery tube and eventually clogging or damaging the melt delivery tube [10]. In order to ensure the continuity of the process before powder production with gas atomization, the aspiration pressure values formed at the end of the melt delivery tube were measured. The aspiration pressure graph is given in Figure 2.



**Figure 2.** Aspiration pressure values at the outlet end of the melt delivery tube for different atomization working pressures.

After the measured aspiration pressures, the atomization pressure was determined as 35 bar to keep both the continuity of the atomization process and the (Gas/Metal Ratio) GMR optimal. This value was determined based on our previous studies [11-12]. Since the aspiration pressure is positive at atomization pressure values of 15 bar and below, it is predicted that the melt delivery tube will be clogged at the beginning of the process. As the negative aspiration pressure increases at 40 and 50 bar atomization pressures, the GMR will decrease. Therefore, the average particle sizes will increase. In their study, Urionabarrenetxea et al. atomized copper and copper alloys at different pressures. They revealed that increasing negative aspiration pressures decreased the GMR and therefore increased particle sizes [13].

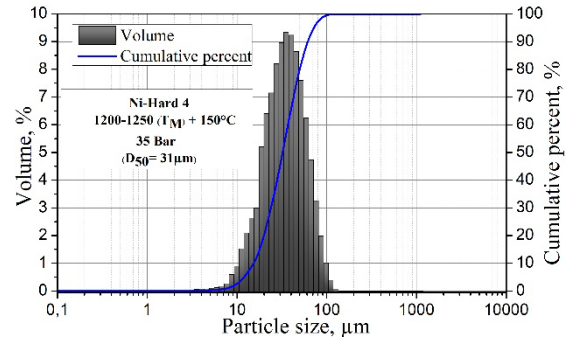
SEM images of Ni-Hard powders are given in Figure 3. When the images are examined, it is seen that the Ni-Hard powders produced under 35 bar pressure mostly have a spherical shape, but long ligament particles draw attention in the image. Ligament structures are generally formed due to 2 parameters. Ligament structures appear due to insufficient kinetic energy transfer to the liquid metal in the primary atomization region due to high liquid metal viscosity and insufficient gas pressure [14].



**Figure 3.** Macro and SEM images of Ni-Hard 4 powders at different magnifications a) macro b) 100x c) 250x

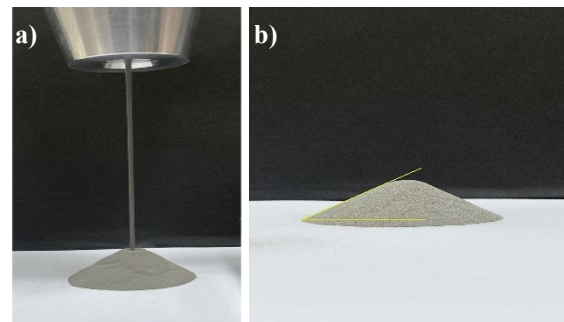
The powders dimensions in the SEM images are in good agreement with the particle size distribution plot given in Figure 4. The average particle size of Ni-Hard 4 powders produced under 35 bar pressure was measured as ( $D_{50}$ ) 31 µm. Ni-Hard 4 powders exhibit a narrow size distribution range. For the cumulative distribution curve to move to the left, it is foreseen that the gas pressure should be

increased. Qing et al. atomized the nickel-based superalloy under 1 2 3 4 and 5 MPa pressures, respectively. They showed that as the atomization pressure increases, the particle size distribution range will narrow and the highest particle size in the histogram will decrease. In short, they revealed that the average powder particle size will decrease [15].



**Figure 4.** Particle size distribution graph of Ni-Hard 4 powders.

Since inert gases are used both during the melting process and during the atomization process, the surface of the powders is relatively smooth and no oxidations have been observed. Hall-Flow and angle of repose properties were determined for the fluidity properties. Figure 5 shows the measurement approach of the angle of repose and hall-flow properties. [16].



**Figure 5.** Hall flow measurement and angle of repose measurement a) Hall-flow b) angle of repose

The Hall flow rate test result of Ni-Hard powders was measured as 22 seconds for 50 g. In addition, the angle of the repose measurement result was determined as 28°. Zegzulka et al. in their study on metal powders with different shapes and particle sizes, revealed that powders with a standing angle of  $20^\circ < \alpha < 30^\circ$  have free flow. They also emphasized that the angle of repose and the flow duration are directly proportional to the sphericity and impurity of the powders [17].

#### 4. CONCLUSION

In this study, Ni-Hard 4 alloy was cast, and then Ni-Hard alloy powders were successfully produced by gas atomization technique. It has been shown that powders have mostly spherical shape due to the nature of gas atomization. In addition, the flow properties of Ni-Hard powders were investigated in detail. It was emphasized that spherical powders showed good fluidity. When the properties of the obtained powders were examined, it was revealed that they showed suitable characteristics for powder metallurgical processes. In recent years, the development of different alloys for the additive manufacturing sector has continued. Ni-Hard 4 alloy appears to be a potential alloy for the additive manufacturing sector, thanks to its superior mechanical and chemical properties (wear, hardness, corrosion resistance, etc.). When the powder properties obtained as a result of gas atomization are examined, additive manufacturing techniques can use this high-performance material.

#### ACKNOWLEDGES

This study was supported by TOYOTETSU TURKEY.

This article was presented orally at the 7th International 3D Printing Technologies and Digital Industry Congress and its abstract was published in the "E-Abstract Book".

#### REFERENCES

1. Çöl, M., Koç, F.G., Öktem, H., Kır, D., "The role of boron content in high alloy white cast iron (Ni-Hard 4) on microstructure, mechanical properties and wear resistance", *Wear*, Vol. 348-349, Pages 158-165, 2016.
2. Anijdan, S.M., Bahrami, A., Varahram, N., Davami, P., "Effects of tungsten on erosion-corrosion behavior of high chromium white cast iron", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 454, Pages 623-628, 2007.
3. Mohammadnezhad, M., Javaheri, V., Shamanian, M., Naseri, M., Bahrami, M., "Effects of vanadium addition on microstructure, mechanical properties and wear resistance of Ni-Hard4 white cast iron", *Materials & Design*, Vol. 49, Pages 888-893, 2013.
4. Yamanoglu, R., Efendi, E., "Enhanced surface properties of iron by in situ hard nickel coating", *Materials Testing*, Vol 58, Issue 2, Pages 151-154, 2016.
5. Ngqase, M., Pan, X., "An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons", In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol 1495, Issue 1, Pages 012023, 2020.
6. Chia, H.Y., Wu, J., Wang, X., Yan, W., "Process parameter optimization of metal additive manufacturing", *Journal of Materials Informatics*, Vol. 2, Issue 4, Pages 16, 2022.
7. Furuya, K., Jitsukawa, S., Saito, T., "Application of the Sinter-HIP Method to Manufacture Cr-Mo-W-V-Co High-Speed Steel via Powder Metallurgy", *Materials*, Vol. 15, Issue 6, 2300, 2022.
8. Rokni, M.R., Widener, C.A., Crawford, G.A., "Microstructural evolution of 7075 Al gas atomized powder and high-pressure cold sprayed deposition", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 251, Pages 254-263, 2014.
9. Yamaoğlu, R., "Atomizasyon teknikleri ile toz üretimi, sinterlenmesi ve karakterizasyonu", Doctoral thesis, [Powder production, sintering and characterization by atomization techniques] [Thesis in Turkish], Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2001.
10. Wang, J., Xia, M., Wu, J., Ge, C., "Nozzle Clogging in Vacuum Induction Melting Gas Atomization: Influence of the Delivery-Tube and Nozzle Coupling", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 67, Issue 4, Pages 1359-1370, 2022.
11. Muratal, O., "Gaz atomizasyonu ile kalay ve bakır esaslı metal tozlarının üretimi", Yüksek Lisans Tezi, [Tin and copper based metal powder production by gas atomization] [Thesis in Turkish], Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2023.
12. Muratal, O., Yamaoğlu, R., Avcu, E., Gökalp, İ., Yavuz, H.İ., Gönülalan, Y., Kurban, M.E., Bayram, E., "Babit Tozunun Gaz Atomizasyonu ile Üretimi ve Saf Demirin Aşınma Özelliklerine Etkisi", Pages 633-644, *Bilgin Kültür Sanat Yayınları*, Ankara, 2023.
13. Urionabarrenetxea, E., Avello, A., Rivas, A., Martín, J. M., "Experimental study of the influence of operational and geometric variables on the powders produced by close-coupled gas atomization", *Materials & Design*, Vol. 199, 109441, 2021.
14. Barreto, E.S., Frey, M., Wegner, J., Jose, A., Neuber, N., Busch, R., Uhlenwinkel, V., "Properties of gas-atomized Cu-Ti-based metallic glass powders

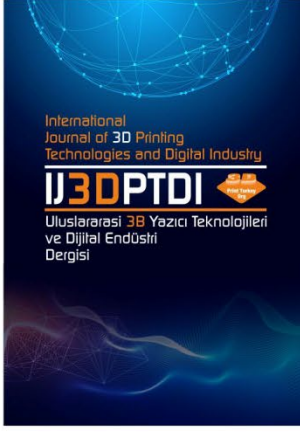


for additive manufacturing”, *Materials & Design*, Vol. 215, Pages 110519, 2022.

15. Qing, Y., Guo, K., Liu, C., Qin, Y., Zhan, Y., Shuo, S., Liu, C., “Impact of Atomization Pressure on the Particle Size of Nickel-Based Superalloy Powders by Numerical Simulation”, *Materials*, Vol. 15, Issue 9, Pages 3020, 2022.

16. Muratal, O., Yavuz, H.İ., Akyıldız, Y., Yüksel, O., Özdemir, Y., Ymanoğlu, R., “Babit alaşım tozlarının gaz atomizasyonu ile üretimi”, 1st International Conference on Innovative Academic Studies, Pages 1588-1592, Konya, 2022.

17. Zegzulka, J., Gelnar, D., Jezerska, L., Prokes, R., Rozbroj, J., “Characterization and flowability methods for metal powders”, *Scientific reports*, Vol. 10, Issue 1, Pages 21004, 2020.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# ADVANCING INDUSTRY 4.0 WITH ROS: A CASE STUDY ON AUTONOMOUS MOBILE ROBOT TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS

**Yazarlar (Authors):** Neslihan DEMİR<sup>ID</sup>, Pinar DEMIRCIOGLU<sup>ID</sup>, Ismail BOGREKCI<sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Demir N., Demircioglu P., Bogrekci I., "Advancing Industry 4.0 With Ros: A Case Study On Autonomous Mobile Robot Technological Advancements" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 130-142, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1366132

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# ADVANCING INDUSTRY 4.0 WITH ROS: A CASE STUDY ON AUTONOMOUS MOBILE ROBOT TECHNOLOGICAL ADVANCEMENTS

Neslihan DEMIR <sup>a,b</sup>, Pinar DEMIRCIOGLU <sup>a,c</sup>, Ismail BOGREKCI <sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, TURKEY

<sup>b</sup> PhD Student of YOK 100-2000 on Robotic Technologies, TURKEY

<sup>c</sup> Institute of Materials Science, TUM School of Engineering and Design, Technical University of Munich, Germany

\* Corresponding Author: [ibogrekci@adu.edu.tr](mailto:ibogrekci@adu.edu.tr)

(Received: 25.09.23; Revised: 13.04.24; Accepted: 21.04.24)

---

## ABSTRACT

In the world of Industry 4.0, Autonomous Mobile Robots (AMRs) are now vital parts of modern industrial automation. This study examines how the Robot Operating System (ROS) plays a crucial role in advancing technology for AMRs. By looking at real-life examples, it shows how ROS helps in creating and using AMRs, changing how industrial processes work. The study demonstrates how ROS is being integrated into AMR design and operation, leading to improved autonomy, flexibility, and productivity in industrial settings. This study discusses how ROS-powered AMRs have transformed various tasks like material handling, warehouse logistics, and autonomous navigation, leading to increased productivity and cost-efficiency. It also explores the challenges and opportunities brought about by ROS in the Industry 4.0 era, including sensor fusion, machine learning, and human-robot teamwork. Furthermore, ROS not only influences the design and operation of AMR, but also enables smooth integration with advanced technologies such as sensor fusion and machine learning. This opens up opportunities for improved flexibility and teamwork between humans and robots in the ever-evolving environment of Industry 4.0. The importance of ROS in connecting traditional manufacturing practices with the changing demands of the fourth industrial revolution is emphasized.

**Keywords:** Autonomous mobile robots, Obstacle avoidance, Artificial intelligence, Robot Operating System, Industry 4.0.

---

## 1. INTRODUCTION

In the current era of technological advancement, establishing optimal manufacturing systems alone is insufficient to ensure the sustainability of companies. Therefore, the integration of Industry 4.0 (I4.0) applications into manufacturing systems is imperative. Industry 4.0 is serving a bridge for coordinating initiative technological systems such as cyber physical systems, internet of things, artificial intelligence, digital twin, blockchain etc. Cyber-physical systems (CPS), one of these systems, are characterized as systems where computational elements interact closely with the physical environment and its ongoing operations. These systems both provide and utilize data-accessing and data-processing services concurrently. CPS include industrial

robots produced with today's technology in production [1]. Numerous international companies have adopted these technologies by bringing together under the Industry 4.0 applications. However, it is evident that these new technological applications are far from cost-effective for small and medium-sized local companies. As a result, the survival of small and medium-sized companies appears increasingly challenging in the coming years.

Recent years have witnessed the integration of new technological applications into businesses, both large and small. Particularly, CPS into manufacturing process have led to more efficient outcomes and the achievement of cost related objective in specific applications. Before CPS technologies, robotic applications

were one level higher than automation technologies, nevertheless still relied on human involvement. Industrial robotic applications along with CPS have reduced dependence on human factor and enabled the creation of optimized processes in manufacturing systems. In this context, Industry 4.0 has been influential to develop the integration of physical and virtual environment with industrial robotic applications. In recent years, Robot Operating System (ROS) has emerged as a framework for combining these two divergent environments in robotic applications.

Given that most businesses in manufacturing industry of Türkiye are of medium and small scale, the cost-effectiveness of such applications is a critical necessity in the years ahead. Meeting this need has become increasingly important, particularly with the growing emphasis on academic research and diverse perspectives on various aspects of manufacturing systems.

It is often observed that in Türkiye, the adaptation of robotic applications along with CPS to the manufacturing sector largely relies on foreign academic and commercial initiatives. Unfortunately, the existing applications in our country are dependent on solutions sourced from abroad. The motivation behind this study is to stimulate the need for new approaches, applications, and research to eliminate this dependency and enable our country to become a technology creator and producer, thus minimizing external reliance.

## 2. LITERATURE REVIEW

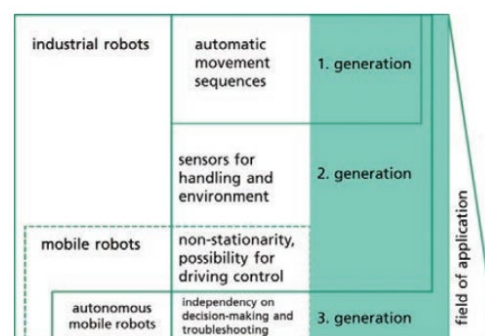
This study aims to unveil an application that minimizes human intervention as much as possible, utilizing the concepts of robotics along with CPS and ROS to facilitate the transfer of required materials such as raw materials, semi-finished products, parts, tools, equipment, and more between operation centers and warehouses within a manufacturing facility. In pursuit of this objective, existing academic and commercial research on mobile autonomous robot applications has been reviewed.

In a competitive market, the use of innovative technologies is crucial for a company's survival. One common form of these technologies is robotics, as highlighted in the World Robotics

2020 Industrial Robots report by the International Federation of Robotics (IFR). The report states that by 2020, there were 2.7 million industrial robots globally, marking a 12% rise in sales from the year before (IFR, 2020). These results highlight the importance for companies to utilize robotics and other innovative technologies in order to stay competitive and successful in a constantly changing environment.

Research indicates a high demand for robotics applications in the manufacturing industry, but it is essential to acknowledge that the innovation levels of these applications vary significantly. Rapid technological advancements necessitate the categorization of robotics applications. Lottermoser et al. (2017) classified industrial robots into three generations based on mobile industrial robots as a starting point. When considering this classification, it is crucial to recognize that not all encountered industrial robot applications are at the same technological level. According to Lottermoser et al. (2017), the three generations of industrial robots are as follows [2]:

- First-generation industrial robots can automatically perform a series of movements at specified intervals.
- Second-generation industrial robots use sensors for their environment and movements. They also have a control mechanism that allows for partial or full dependence on human factors during applications, with flexibility beyond rigidity.
- Third-generation industrial robots are capable of operating entirely autonomously, making decisions and functioning independently when facing challenges during applications.



**Figure 1.** The developmental phases of industrial robots.

It's important to note that this generational classification provides a framework for understanding the progression of industrial robot capabilities. However, in practice, there may be variations and overlaps between generations, and the classification may not always perfectly align with specific robot models or applications. As technology continues to evolve, the lines between these generations may blur further, leading to even more capable industrial robots in the future.

In the classification of Lottermoser et al., third generation industrial robots are referred to as Industrial Mobile Robots (IMRs). According to ANSI R15.08, there are three types of IMRs, listed in Table 1.

**Table 1.** Types of IMRs according to ANSI

<b>Types</b>	<b>Features</b>
<b>Type A</b>	AGV or AMR
<b>Type B</b>	AGV or AMR + active or passive attachments such as conveyor, roller table etc.
<b>Type C</b>	AGV or AMR + Robotic Manipulator

Robotic Industries Association (RIA) takes into account Automated Guided Vehicle (AGV) and Autonomous Mobile Robot (AMR) in all types of IMRs. But it also defined that AGV is capable of following exact guide paths, whether physical or virtual, such as lines, bands or magnets and AMR is capable of generating dynamically paths based on the current environment and determining the most efficient trajectory between the current location and target destination. Unlike AGVs, AMRs do not rely on fixed paths and can adapt to changes in their surroundings [3]. The difference between AGVs and AMRs shows how robotic systems are improving to work independently in changing industrial settings, making manufacturing processes more efficient and adaptable.

AGVs are common, but they follow predefined paths on the ground and do not require extensive support. In contrast, autonomous industrial mobile robots, powered by AI algorithms, handle tasks like positioning, mapping, path planning, and navigation. This autonomy minimizes human intervention and enhances manufacturing processes' flexibility and efficiency. Therefore, based on these

characteristics, one could assert that the autonomous mobile robot discussed in the research represents the third generation of industrial mobile robots as AMR. Essentially, it is an independent robot operating with ROS, equipped with decision-making and problem-solving capabilities that do not rely on human intervention.

Until the last decade, AGVs were predominantly favored for industrial applications over IMRs. Zhang et al. (2018) developed a cyber-physical system-based model for dynamic shop floor material handling with AGVs and base stations [4]. However, AMRs have acquired significant attention in academic studies over the past decade. Santoro (2021) developed a sensory system capable of autonomous movement in industrial environments, facilitating interaction between human operators and autonomous mobile robots (AMRs). The AMR featured four mecanum-wheeled mobility, enabling omnidirectional movement, and incorporated algorithms aimed at reducing computational costs while fusing and filtering sensor data [5].

The literature contains various approaches, perspectives, and studies related to mobile robots. Researchers collaborate across disciplines to undertake the complicated challenges of autonomous robot development. Particularly, due to the interdisciplinary nature of the field of robotics, there are relatively few comprehensive studies on the creation of mobile robots as a whole. In addition to the literature, there is also a significant global market for commercial applications. The leading companies in the global autonomous mobile robot market are listed in Table 2.

These visionary companies stand at the forerunner of shaping the future of automation and robotics. With a firm commitment to this technology, research, and development, they have guided in a diverse array of autonomous mobile robot solutions across numerous industries, spanning manufacturing, logistics, healthcare, and beyond. These enterprises not only pursue excellence in product design and functionality but also employ significant influence in propelling the field forward through their contributions to academic research (Table 3) and technological innovation.

**Table 2.** The leading companies operating in the autonomous mobile robot market.

<b>Company</b>	<b>Website</b>	<b>Country</b>
<b>KUKA</b>	<a href="http://www.kuka.com">www.kuka.com</a>	Germany
<b>ONWARD ROBOTICS</b>	<a href="https://onwardrobotics.com/">https://onwardrobotics.com/</a>	USA
<b>Locus</b>	<a href="http://www.locusrobotics.com">www.locusrobotics.com</a>	USA
<b>6river Systems</b>	<a href="http://www.6river.com">www.6river.com</a>	USA
<b>ZEBRA Robotics</b>	<a href="http://www.zebra.com/us/en.html">www.zebra.com/us/en.html</a>	USA
<b>inVia Robotics</b>	<a href="http://www.inviarobotics.com">www.inviarobotics.com</a>	USA
<b>Clearpath Robotics</b>	<a href="http://www.clearpathrobotics.com">www.clearpathrobotics.com</a>	Canada
<b>Magazino</b>	<a href="http://www.magazino.eu">www.magazino.eu</a>	Germany
<b>Grey Orange</b>	<a href="http://www.greyorange.com">www.greyorange.com</a>	USA
<b>DAHIEN Robotics</b>	<a href="http://www.daihen-robot.com/en/">www.daihen-robot.com/en/</a>	Japan
<b>Geek+ Technologies</b>	<a href="http://www.geekplus.com/en/">www.geekplus.com/en/</a>	China
<b>Syrius Technology</b>	<a href="https://siriustech.io/">https://siriustech.io/</a>	China
<b>Mobile Industrial Robotics</b>	<a href="http://www.mobile-industrial-robots.com">www.mobile-industrial-robots.com</a>	Denmark
<b>Amazon Robotics</b>	<a href="http://www.amazonrobotics.com/#/">www.amazonrobotics.com/#/</a>	USA
<b>Astro Technologies</b>	<a href="http://www.astrotechnology.com/">www.astrotechnology.com/</a>	USA
<b>Conveyco Technologies</b>	<a href="http://www.conveyco.com/">www.conveyco.com/</a>	USA
<b>Vecna Robotics</b>	<a href="http://www.vecnarobotics.com/">www.vecnarobotics.com/</a>	USA
<b>Atheon</b>	<a href="https://aethon.com/">https://aethon.com/</a>	USA
<b>Bluebotics</b>	<a href="http://www.bluebotics.com/products/">www.bluebotics.com/products/</a>	Switzerland
<b>Hi-Tech Robotic Systemz</b>	<a href="http://www.hitechroboticsystemz.com/">www.hitechroboticsystemz.com/</a>	India
<b>Symbolic (prev CasePick Systems)</b>	<a href="http://www.symbolic.com/solutions/">www.symbolic.com/solutions/</a>	USA
<b>Rovenso</b>	<a href="http://www.rovenso.com/">www.rovenso.com/</a>	Switzerland
<b>Pal Robotics</b>	<a href="http://pal-robotics.com/">pal-robotics.com/</a>	Spain
<b>Accerion</b>	<a href="https://accerion.tech/">https://accerion.tech/</a>	Netherlands
<b>Robotnik</b>	<a href="http://www.robotnik.eu">www.robotnik.eu</a>	Spain
<b>IncubedIT GmbH</b>	<a href="http://www.incubedit.com/">www.incubedit.com/</a>	Austria
<b>Botsync</b>	<a href="http://www.botsync.sg/">www.botsync.sg/</a>	Singapore
<b>CtrlWorks Pte Ltd</b>	<a href="http://www.ctrlworks.com/">www.ctrlworks.com/</a>	Singapore
<b>Autonomous Logistics Technologies</b>	<a href="http://www.alogtech.com/">www.alogtech.com/</a>	USA
<b>Robocv</b>	<a href="http://robocv.com/">robocv.com/</a>	Russia
<b>Oxbotica</b>	<a href="http://www.oxbotica.com/">www.oxbotica.com/</a>	United Kingdom
<b>Milvus Robotics</b>	<a href="http://milvusrobotics.com/">milvusrobotics.com/</a>	Türkiye
<b>Lars Robot</b>	<a href="http://www.larsrobot.com/">www.larsrobot.com/</a>	Türkiye
<b>Etnamatica</b>	<a href="http://www.etnamatica.com/index.php">www.etnamatica.com/index.php</a>	Italy
<b>Follow Inspiration S.A.</b>	<a href="http://followinspiration.pt/">http://followinspiration.pt/</a>	Portugal

As the demand for autonomous mobile robots continues its relentless climb across global markets, these industry leaders remain indispensable drivers of progress, reshaping our perception and utilization of robotics in the modern world.

Industrial mobile robots hold an undeniable appeal for a numerous of researchers, engineers, and global industry giants, owing to their adaptable and impactful nature. Simultaneously, they offer a fertile ground for interdisciplinary exploration, spanning mechanical, electronic, computer, and software engineering domains.

The versatility and potential of industrial mobile robots make them a significant focus of research and development efforts. These robots attract attention from various disciplines, from mechanical and electronic engineering to computer science and software development. The interdisciplinary nature of industrial mobile robots fosters innovation and collaboration on a global scale. As these technologies progress, they have the potential to transform how automation and robotics are approached in different industries, leading to increased efficiency and productivity levels.

**Table 3.** Academic Studies on Autonomous Mobile Robots.

Author(s)	Year	Study Title and Description
Marroquin, A., Garcia, G., Fabregas, E., Aranda- Escolastico, A., Farias, G. [6]	2023	<p><b>Title:</b> Mobile Robot Navigation Based on Embedded Computer Vision</p> <p><b>Description:</b> The previous level of technology allowed for the creation of solutions using tools such as mobile robots and programmable electronic systems. A new design was introduced that combined the Khepera IV mobile robot with an NVIDIA Jetson Xavier NX board. This configuration ran a navigation control algorithm that relied on computer vision and included a model for detecting objects. The Khepera IV then had additional features like guided driving, which included tracking trajectories for safe navigation and identifying traffic signs to make informed decisions. A robotic platform was built to test the system in real-time and compare it to a digital model of the Khepera IV in the CoppeliaSim simulator. The findings from the navigation control study showed a noticeable improvement compared to previous efforts, particularly in terms of how fast a vehicle could navigate and how accurately it could detect traffic signs. The analysis of navigation control showed that the system was successful around 93% of the time. The design also allowed for the experimentation with new control strategies or algorithms based on Python, which could lead to further enhancements in the future.</p>
Hercik, R., Byrtus, R., Jaros, R., Koziorek, J. [7]	2022	<p><b>Title:</b> Implementation of Autonomous Mobile Robot in SmartFactory</p> <p><b>Description:</b> This research explored the integration of Autonomous Mobile Robots (AMRs) within the production line context at the Technical University of Ostrava. AMRs were strategically deployed to collaborate with the production line, facilitating the collection and delivery of manufactured items as required. The study elaborated on the procedural steps involved in initializing the AMR, including the creation of a virtual map, establishment of a robust communication network, and programming of the robot's functionalities. Emphasizing precision and attention to detail, the primary objective of the experiment was to evaluate the mobility and communication capabilities of the mobile robot. The research underscored the paramount importance of accuracy in its operations, with a focus on achieving precise movements within <math>\pm 3</math> mm tolerance. The culmination of this study was the development of a self-driving robot capable of reliably executing tasks with exceptional accuracy, thereby enhancing production efficiency in smart factory environments.</p>
Jang, K., Kim, S., Park, J. [8]	2021	<p><b>Title:</b> Reactive Self-Collision Avoidance for a Differentially Driven Mobile Manipulator</p> <p><b>Description:</b> The research focused on developing a self-collision avoidance algorithm designed for a differentially driven mobile manipulator. The main goal was to address the issue of self-collision arising when a manipulator interacts with a mobile robot. The aim was to create an algorithm enabling the manipulator to move smoothly without risking collisions with itself, while maintaining its intended motion profile. The primary objective of the study was to enable the robot to navigate autonomously in a safe and efficient manner, adjusting its actions to avoid obstacles. By creating and testing a self-collision avoidance algorithm, the research made a valuable contribution to robotics advancement, particularly in the domain of mobile manipulators with differential drive systems.</p>
Luo, R. C., Lee, S. L., Wen, Y. C., Hsu, C. H. [9]	2020	<p><b>Title:</b> Modular ROS Based Autonomous Mobile Industrial Robot System for Automated Intelligent Manufacturing Applications</p> <p><b>Description:</b> The purpose of this study was to create a modular ROS system that focused on an IMR system, specifically designed for use in intelligent manufacturing applications. This involved using a finite state machine to seamlessly integrate and control different modular features within the mobile manipulator, improving its mobility and manipulation abilities. For mobility, the robot utilized SLAM technology to map out its surroundings and pinpoint its location. Furthermore, navigation and collision avoidance strategies were developed to enable it to move freely throughout indoor environments. To enable manipulation, we utilized an RGB-D camera mounted on the end</p>

		<p>effector for an eye-in-hand system. This system leveraged learning-based object detection and shape-based grasping pose estimation to enhance flexible manipulation capabilities. Our robotics lab at National Taiwan University had developed an IMR with a meticulously designed mechanism and a fully modular ROS environment. The experiments included setting up an intelligent industrial scenario where materials were collected and products were transported from one location to another. Through our ROS-based architecture managing the data/command flow between functions, we successfully demonstrated the system and validated its stability.</p>
Ramasubramanian, A.K., Papakostas, N. [10]	2020	<p><b>Title:</b> Operator - mobile robot collaboration for synchronized part movement  <b>Description:</b> The study introduced a new method that allowed an operator and a mobile robot to collaborate in loading, unloading, and transporting parts. Emphasizing the integration of tasks performed by the operator and the mobile robot, the study focused on implementing a practical control strategy. The success of this approach relied on seamless coordination between the human operator and the robot system. To achieve this, researchers developed a control strategy capable of aligning tasks initiated by the operator with the actions of the mobile robot. The study operated on the premise that the robotic arm and gripper possessed the necessary capabilities to handle the specified load. Consequently, the proposed method proved suitable for scenarios involving heavy or elongated parts, where combining human and robot capabilities could enhance efficiency and productivity. By introducing a flexible control strategy for operator-robot teamwork, the study laid the groundwork for enhanced collaboration between human workers and automated mobile devices across various industrial settings. The findings indicated that this approach could effectively be applied in situations where leveraging the distinct advantages of both human and robotic skills could significantly improve the manipulation of heavier and larger components.</p>
Pääkkönen, R. [11]	2020	<p><b>Title:</b> Cloud-based Remote Control of Autonomous Mobile Robots in Industrial Environments  <b>Description:</b> The master's thesis discussed the utilization of cloud technology to control mobile robots in industrial settings. The research investigated how cloud computing could enable rapid responses and simulate an industrial environment. In a laboratory setting, a robot was constructed on a cloud user's virtual machine, and tests were conducted. The findings demonstrated that utilizing cloud-based digital twinning proved to be an effective method for virtualizing autonomous robots in industrial environments. The described technology facilitated immediate response times and the development of intricate models for industrial scenarios. The study's results underscored the advantages of cloud-based remote control and digital twinning in revolutionizing the simulation, management, and optimization of industrial settings for enhanced efficiency and productivity.</p>
Aiello, A. [12]	2020	<p><b>Title:</b> Robotic arm pick-and-place tasks: Implementation and comparison of approaches with and without machine learning (deep reinforcement learning) techniques  <b>Description:</b> The research combined two different methods to complete tasks. The traditional approach used advanced technology but did not include modern AI techniques. The alternative approach tackled the same issue with machine learning. In the traditional method, tools like MoveIt, Gazebo, and RViz in the ROS framework were used. The second method utilized deep reinforcement learning to solve the problem with machine learning techniques. The research aimed to offer valuable insights into the benefits and possible improvements of incorporating machine learning methods, particularly deep reinforcement learning (RL), into practical robotic applications.</p>
Bergani, H.A.F. [13]	2019	<p><b>Title:</b> Design &amp; construction of mobile robot with a manipulator arm for multipurpose application  <b>Description:</b> The study presented the design and development of a versatile, wheeled mobile robot suitable for multipurpose applications. The hardware system encompassed a carefully selected robot platform, components,</p>



		<p>microcontroller, electronics, sensors, and electrical control circuits to support comprehensive sensing functions. Furthermore, a methodology was planned for positioning a limited number of sensors on the robot chassis, optimizing its suitability for autonomous navigation. The research also included the development of a program that enabled the robot to perform specific tasks such as line following and obstacle avoidance, enhancing its capabilities for diverse applications.</p>
<b>Oltean, S.E. [14]</b>	2019	<p><b>Title:</b> Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation  <b>Description:</b> The research introduced an affordable mobile robot setup with a stable four-wheel design, utilizing the connections of Raspberry Pi and Arduino Uno. This robot was capable of mapping, navigating, avoiding obstacles, and following lines. Moreover, it included a robotic arm with one degree of freedom for lifting and moving loads. By combining Raspberry Pi and Arduino Uno, the robot could efficiently carry out autonomous navigation tasks, making it suitable for diverse applications in different settings. This platform was a user-friendly and cost-effective option that allowed researchers and developers to delve into mobile robot technologies. It served as a reliable base for creating a variety of applications in this rapidly growing field.</p>
<b>Sichkar, D.P., Bezumnov, N., Voronov, V.I., Voronova, L.I., Dankovtsev, V.I. [15]</b>	2019	<p><b>Title:</b> Moving Elements of Mobile Robots Stabilization Modelling  <b>Description:</b> The study tackled the issue of keeping mobile robots stable as they carried heavy loads. To address this challenge effectively, a simulation process was created. This simulation focused on determining the exact balance points for different parts of the robot, using an open artificial intelligence system. A key factor in the success of the study was the incorporation of machine learning technology. Machine learning algorithms were used to analyze and improve the sensor architecture for load transportation. The TensorFlow library, along with the tflearn extension, was utilized for detection and data processing tasks in the machine learning-based approach. The study also included real-world applicability, moving beyond theoretical simulations. Network training was conducted in an open artificial intelligence environment using the Gym library. This practical aspect ensured that the research findings could be implemented in actual mobile robot systems.</p>
<b>Bostelman, R. [16]</b>	2018	<p><b>Title:</b> Performance Measurement of Mobile Manipulator  <b>Description:</b> The study focused on creating models and defining research areas to measure the performance of a mobile manipulator used in a specific manufacturing application. The research explored applications that were unable to measure the performance of mobile manipulators at the time. It delved into uncharted territories to discover new and innovative ways to assess mobile manipulator performance. Through thorough investigation and analysis, the study aimed to enhance understanding and improve the evaluation of these adaptable robotics systems.</p>
<b>Lee, H.Y., Murray, C.C. [17]</b>	2018	<p><b>Title:</b> Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing system  <b>Description:</b> The research examined how two different types of mobile robots were used to fulfill orders at a loading depot. One robot, called a picker, gathered items from shelves, while the other, a transporter, carried the items to the packaging station based on a list of what needed to be picked. To expedite the delivery process to the packaging station, a strategy was created that considered the challenges of routing vehicles for loading, unloading, and transporting items. A sophisticated mathematical model was created to tackle three main issues. Next, the study looked into how the mix of robots in the fleet could be changed to improve performance. Then, it studied how the layout of the warehouse affected the system's performance when using mobile robots. The research showed that having more paths crossing the aisles led to lower system performance, centrally located packaging stations improved system performance, and the distance between packaging stations and loading positions played a key role in identifying fleet changes enhancing system efficiency.</p>

Urrea, C., Yau, A. [18]	2016	<p><b>Title:</b> Design, Construction and Programming of a Mobile Robot Controlled by Artificial Vision</p> <p><b>Description:</b> The study discussed creating a mobile robot that used computer vision to recognize objects of various colors. The robot received advanced artificial intelligence through a program on a laptop. Emphasis was placed on the robot's mechanical durability for practical use. The robot was upgraded with a fake vision camera and a distance sensor so it could move around by itself and gather important information about its surroundings. The main aim of the study was to increase the robot's vision range to 180 degrees. With this wider scope, the robot could now be more precise in its movements and tasks. This new ability made it more adaptable and useful in various fields like industrial automation and advanced robotics research.</p>
Eliot, E. [19]	2013	<p><b>Title:</b> Design, Analysis and Fabrication of An Articulated Mobile Manipulator</p> <p><b>Description:</b> The research aimed to investigate a versatile mobile robot manipulator designed for complex loading and placement tasks in dynamic environments. The manipulator system included a 5-axis articulated arm for loading and placement applications, adaptable to various task variations. Key drive and power components were strategically placed at the lower section for optimal load distribution and efficient handling. With a state-of-the-art suspension system, the mobile platform was designed for maximum stability and weight-bearing capabilities, efficiently distributing weight across the wheels for optimal performance.</p>

### 3. ANALYSIS OF KEY PARAMETERS IN AUTONOMOUS MOBILE ROBOTICS

When examining critical factors related to self-propelled moving robots, the point is to measure and internalize a number of things pivotal for their efficient working and efficacy. While navigating a robot or making it make decisions as well as controlling it among many other chores, one must take into consideration the above aspects for the robot to work properly. They are presented in tabular form (Table 4).

**Table 4.** Analysis of Key Parameters in Autonomous Mobile Robotics [20].

Parameter	Description	Importance Level
Sensors	Types, Fusion	High
Localization	Methods, Accuracy	High
Mapping	Algorithms, Resolution	High
Path Planning	Algorithm, Efficiency	High
Control	Architecture, Feedback	High
ROS	Software framework	High
Obstacle Avoidance	Obstacle Detection, Safety	High
Environment	Indoor/Outdoor, Terrain	High
Payload Capacity	Weight, Handling	Medium

<b>Diagnostics and Telemetry</b>	Error Reporting, Monitoring	Medium
<b>Power Management</b>	Battery Life, Charging	Medium
<b>Communication</b>	Connectivity, Protocols	Medium
<b>Machine Vision</b>	Object Recognition	High
<b>Decision-Making</b>	AI, Behavioral	High
<b>Human-Robot Interaction (HRI)</b>	Interface, Safety	Medium
<b>Maintenance and Reliability</b>	Requirements, Reliability	Medium
<b>Cost and Scalability</b>	Analysis, Scalability	Medium
<b>Regulatory and Ethical Considerations</b>	Compliance, Ethics	Medium

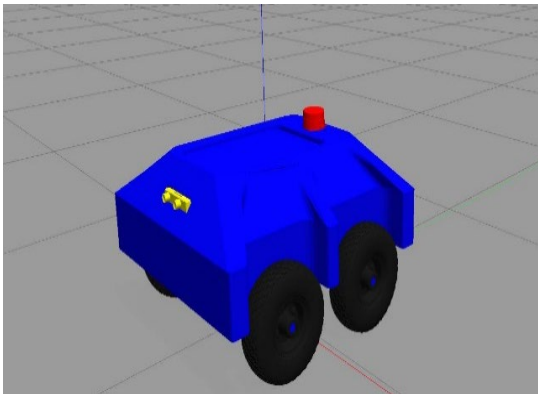
### 3. CASE STUDY: APPLICATIONS WITH ROS

ROS serves as middleware that abstracts the hardware layer, manages devices at the hardware level, codes commonly used functions, facilitates communication between operations, and executes packages for robotic systems. It functions as a framework that handles both physical components and communication networks for data management in robotic applications. Given these attributes,

leveraging applications for CPSs with the ROS middleware proves to be beneficial.

In the ROS environment, various practical applications tailored to real-world scenarios of mobile transportation robots are achievable through the utilization of Gazebo and Rviz interfaces. ROS packages specifically designed for each pertinent task can be effectively employed. Gazebo serves as the platform for three-dimensional simulation, while Rviz facilitates three-dimensional visualization.

This research investigates the development of the ProdigyMover [21], an autonomous mobile transportation robot, within the domain of scientific research projects conducted at Adnan Menderes University. Specifically, the study explores its design and implementation within ROS framework, alongside its autonomous navigation capabilities evaluated within the simulated Gazebo environment, employing a range of methodological approaches in Figure 2. We aim to confirm the efficiency of our methods and provide valuable insights to the autonomous robotics field through thorough testing and analysis in the simulated Gazebo environment.



**Figure 2.** The ProdigyMover: Navigating the Empty World of Gazebo.

The key point is to compose a robotic system (physical system) together with communication network (ROS). There are three types of communication in ROS, messages (publisher and subscriber), services (server-client) and actions. In this application, publisher and subscriber was selected for communication. The publisher node sent out messages without specifying or having knowledge of the subscriber. The subscriber, in turn, selected the relevant message from the published messages. The ROS master initialized and facilitated

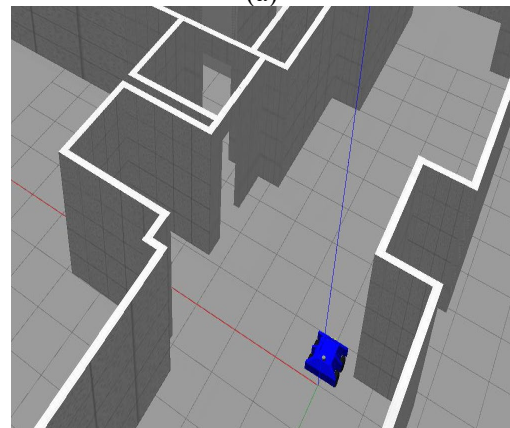
communication between nodes, managing and executing information about the nodes.

The mobile transportation robot's execution of its intended tasks primarily unfolds within the Gazebo environment. This is attributed to the comprehensive description of its links and joints encapsulated within the description package, allowing for the instantiation of a fully embodied mobile robot within the simulation realm.

Within this ROS-enabled simulation package, worlds have been meticulously crafted, each with its unique characteristics and nomenclature. Worlds are illustrated in Figure 3 for simulating a workhouse and warehouse. Simulation package enables to execute algorithms of mapping, localization and path planning, which enable autonomous mobility and obstacle avoidance in unknown environment. This simulation environment plays a key role in validating the effectiveness and robustness of the implemented algorithms, ensuring the ProdigyMover's readiness for real-world deployment in various practical scenarios.



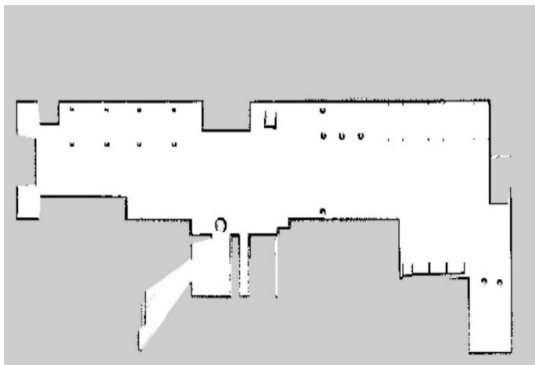
(a)



(b)

**Figure 3.** The ProdigyMover's Endeavors in Gazebo's Workhouse and Warehouse Environments.

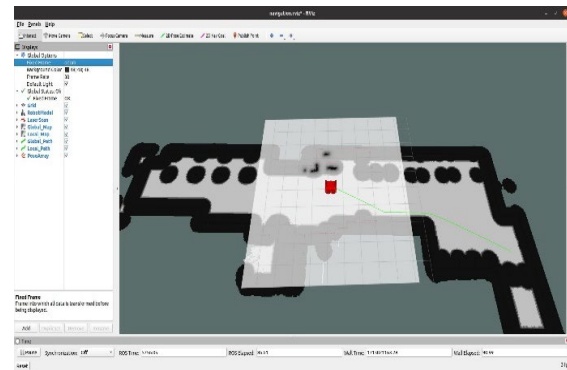
Simultaneous Mapping and Localization (SLAM) algorithms constructed firstly laser-based gmapping for mapping of creating existing world. Thus created map could be utilized for localization and path planning algorithms, presented in Figure 4. The 'Workhouse' simulation environment constitutes a purposeful construct characterized by a linear track featuring distinct start and end points. This configuration has been thoughtfully designed to facilitate a spectrum of experimental tasks centered around path planning and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) algorithms. On a created map, global and local maps were included and so global and local plans could be generated by using path planning algorithms. This integrated approach ensures the coordination between mapping, localization, and path planning processes, enhancing the Prodigimover's autonomy and adaptability in navigating complex environments.



**Figure 4.** Created map of workhouse world by SLAM gmapping.

Localization was fulfilled with Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) algorithm. This algorithm allowed to estimate mobile robot position and orientation by utilizing odometry data. In this technique, particles represented potential position and direction of mobile robot. Each translocation induced distribution and probabilistically weighting of these particles.

Path planning process also performed simultaneously with AMCL. In ROS environment, move base package was utilized to carry out path planning algorithms. Global and local plans were created by path planning algorithms. It was illustrated in Figure 5.



**Figure 5.** Autonomous movement through path planning algorithms in Rviz.

#### 4. ADVANCING INDUSTRY 4.0: KEY CONSIDERATIONS IN ENHANCED CONNECTIVITY, AI INTEGRATION, CUSTOMIZATION

The autonomous navigation and control of mobile robots represent a foremost and complicated challenge within the field of robotics. For any autonomous vehicle, the essential prerequisites revolve around proficient obstacle detection and precise line-following capabilities. The foundation of successful autonomous navigation systems is highlighted by these fundamental features, and they are thought indispensable for ensuring the safe and efficient movement of robotic objects in various environments. In this academic discourse, the details of these core requirements are explored, with their significance, associated challenges, and the technological advancements that drive progress in this crucial area of research and development within robotics being clarified.

In the context of Industry 4.0, significant advancements in autonomous mobile robots have been witnessed, exemplified by their increasing integration into various sectors. Here are more examples of these advancements, presented in passive sentences:

- Enhanced Connectivity and Communication: Autonomous mobile robots are being equipped with advanced sensors and communication modules, allowing them to be seamlessly integrated into industrial networks and controlled remotely. Data exchange and real-time coordination are enabled, facilitating efficient decision-making in complex manufacturing environments.

- AI and Machine Learning Integration: Autonomous robots are being equipped with AI and machine learning capabilities, enabling them to autonomously learn and adapt to their surroundings. This includes the ability to recognize and respond to changes in the production line, optimizing tasks such as quality control, defect detection, and predictive maintenance.

- Customization and Flexibility: The trend of customization and flexibility in manufacturing is supported by autonomous robots that are easily reprogrammable and adaptable to varying production requirements. They can be quickly redeployed for different tasks, allowing for responsive manufacturing processes.

- Collaborative Robotics: Collaborative robots, designed to work alongside human operators, are increasingly being utilized in scenarios where safety is vital. They are equipped with features such as sensors and collision avoidance systems, ensuring safe and efficient collaboration between robots and human workers.

- Autonomous Material Handling: In logistics and warehousing, the integration of autonomous mobile robots for material handling has become prevalent. These robots are guided by real-time data to select optimal routes, transport goods, and autonomously adapt to changing warehouse layouts, streamlining the entire supply chain.

- Aerial Robots and Drones: The application of aerial robots and drones is expanding across industries. Equipped with advanced sensors, cameras, and autonomous navigation capabilities, they are used for tasks such as aerial inspections, monitoring, and data collection in agriculture, construction, and environmental monitoring.

- Energy Efficiency and Sustainability: Autonomous robots are being designed with a focus on energy efficiency and sustainability. Energy-saving features, such as regenerative braking and intelligent power management systems, are incorporated to minimize their

environmental footprint while optimizing operational costs.

- Cybersecurity Measures: Ensuring the cybersecurity of autonomous mobile robots is paramount. Robust security protocols and regular software updates are implemented to safeguard these robots from potential cyber threats, preserving data integrity and operational safety.

- Predictive Maintenance Strategies: Autonomous robots are equipped with diagnostic sensors that continuously monitor their performance. By analyzing this data, predictive maintenance schedules can be generated, allowing proactive servicing to reduce unplanned downtime and enhance system reliability.

These examples illustrate the pervasive impact of autonomous mobile robots in Industry 4.0, with passive sentences highlighting their integration, adaptability, and safety measures, all contributing to the transformation of industrial processes and logistics.

## 5. CONCLUSION

In conclusion, this case study has offered important lessons regarding the using of ROS in propelling Industry 4.0 forward, focusing on the fundamental technological advancements associated with self-governing mobile robots. It shows how important ROS is in driving technological growth in this area through careful consideration of practical applications and demonstrations in driving forward progress and shaping the future of robotics.

The design and operation of AMRs have been demonstrated through integration with ROS, showing how enhanced autonomy, adaptability, as well efficiency can be realized in industry settings. The areas are sensors, mapping, path planning, control and human-robot interaction all of which serve to show how robots keep changing by using ROS and as a result are more competent and adaptable.

Moreover, ROS has been investigated for its role in connecting old-school manufacturing operations with the constantly changing requirements of Industry 4.0. The great attention is paid to the integration of sensor data, machine learning and communication

systems through ROS for sound decision making processes as far as high precision machine vision systems are concerned.

In addition, we have underscored the crucial role played by ROS in guaranteeing the safety, dependability and expansibility of self-driving mobile robots so that they can be successfully used in industry. Furthermore ethical issues related to them which are very essential need to be considered. Promoting a future where robotics raises productivity while prioritizing humanity and societal values.

This case study essentially confirmed that ROS is more than just a framework – it is the one thing that changes everything in achieving Industry 4.0. In recent times, autonomous mobile robots have increasingly become part and parcel of contemporary industrial processes, something that places ROS at the center of their development and operation. It is a fact that through technological innovation such as the one demonstrated in this study, new limits in autonomous robotics possibilities within the industry 4.0 space are being continuously discovered.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This study presents the results of a project funded by the Scientific Research Projects (MF-22002) at Aydın Adnan Menderes University. The project team extends their gratitude to Aydın Adnan Menderes University for their support.

#### REFERENCES

- Liu, H., Wang, L. "Remote human-robot collaboration: A cyber-physical system application for hazard manufacturing environment", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 54, Pages 24-34.
- Lottermoser, A., Berger, C., Braunreuther, S., Reinhart, G., "Method of Usability for Mobile Robotics in a Manufacturing Environment", *Procedia CIRP*, Vol. 62, Pages 594-599, 2017.
- ANSI (American National Standards Institute) *Industrial Mobile Robots - Safety Requirements - Part 1: Requirements for The Industrial Mobile Robot (ANSI/RIA R15.08-1-2020)*, 2020.
- Zhang, Y., Zhu, Z., and Lv, J., CPS-Based Smart Control Model for Shopfloor Material Handling. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 14, Issue 4, Pages 1764-1775, 2018.
- Santoro, S., "Design and implementation of a Sensory System for an Autonomous Mobile Robot in a Connected Industrial Environment.", MSc Thesis in Mechatronic Engineering, Politecnico Di Torino, 2021.
- Marroquin, A., Garcia, G., Fabregas, E., Aranda-Escolastico, E. and Farias, G., *Mobile Robot Navigation Based on Embedded Computer Vision*. *Mathematics*. Vol. 11, Pages 2561, 2023.
- Hercik, R., Byrtus, R., Jaros, R. and Koziorek, J. *Implementation of Autonomous Mobile Robot in SmartFactory*. *Applied Sciences*. Vol. 12, Issue 17, Pages 8912, 2022.
- Jang K, Kim S, Park J., "Reactive Self-Collision Avoidance for a Differentially Driven Mobile Manipulator", *Sensors (Basel)*, Vol. 21, Issue 3, 890, 2021.
- Luo, R. C., Lee, S. L., Wen, Y. C. and Hsu, C. H. *Modular ROS Based Autonomous Mobile Industrial Robot System for Automated Intelligent Manufacturing Applications*. 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Pages 1673-1678, Boston, MA, USA. 2020.
- Ramasubramanian, A.K., Papakostas, N., "Operator - mobile robot collaboration for synchronized part movement", *Procedia CIRP*, Vol. 97, Pages 217-223, 2021.
- Pääkkönen, R., "Cloud-based Remote Control of Autonomous Mobile Robots in Industrial Environments", Unpublished MSc Thesis, Aalto University, 2020.
- Aiello, A. "Robotic arm pick-and-place tasks: Implementation and comparison of approaches with and without machine learning (deep reinforcement learning) techniques", Unpublished MSc Thesis, Politecnico di Torino, 2020.
- Berkani, H.A.F., "Design & construction of mobile robot with a manipulator arm for multipurpose application", Unpublished MSc Thesis, Université Oum EL-Bouaghi, 2019.
- Oltean, S.E., "Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation", *Procedia Manufacturing*, Vol. 32, Pages 572-577, 2019.
- Sichkar, D.P., Bezumnov, D.N., Voronov, V.I., Voronova, L.I., Dankovtsev, V.I., "Moving Elements of Mobile Robots Stabilization Modelling", 2019 *Systems of Signals Generating*

and Processing in the Field of on Board Communications, Pages 1-5, Moscow, 2019.

16. Bostelman, R., "Performance measurement of mobile manipulators", Unpublished PhD Thesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.

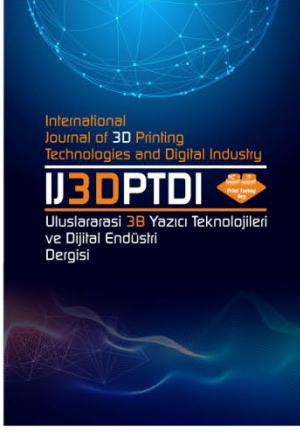
17. Lee, H.Y., Murray, C.C., "Robotics in order picking: evaluating warehouse layouts for pick, place, and transport vehicle routing systems", International Journal of Production Research, Vol. 57, Issue 18, Pages 5821-5841, 2019.

18. Urrea, C., Yau, A., "Design, Construction, and Programming of a Mobile Robot Controlled by Artificial Vision: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications", In book: Rapid Automation Pages 411-431, 2019,

19. Eliot, E., "Design, analysis and fabrication of an articulated mobile manipulator", Unpublished MSc Thesis, NIT Rourkela, 2013.

20. Alatise, M.B., Hancke, G.P., "A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods," in *IEEE Access*, Vol. 8, Pages 39830-39846, 2020.

21. Demir, N. "Development of A Mobile Robot Perorming Transport Implmentations in A Manufacturing Plant" Unpublished PhD Thesis, Aydin Adnan Menderes University, 2024.



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# DİJİTAL DÖNÜŞÜM ENDEKSİ PARAMETRELERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF DIGITAL TRANSFORMATION INDEX  
PARAMETERS WITH MULTI-CRITERIA DECISION  
MAKING METHOD

**Yazarlar (Authors):** İrem Düzdar Argun<sup>ID\*</sup>, Zülal Beşbaş<sup>ID</sup>, Ufuk Öztürk Peker<sup>ID</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Argun İ. D., Beşbaş Z., Peker Öztürk U., "Dijital Dönüşüm Endeksi Parametrelerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(1): 143-153, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1321818

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>



# DİJİTAL DÖNÜŞÜM ENDEKSİ PARAMETRELERİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

İrem Düzdar Argun<sup>a</sup> , Zülal Beşbaş<sup>a</sup> , Ufuk Öztürk Peker<sup>a</sup> 

<sup>a</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Corresponding Author: [iremduzdar@duzce.edu.tr](mailto:iremduzdar@duzce.edu.tr)

(Geliş/Received: 19.07.23; Düzeltme/Revised: 13.02.24; Kabul/Accepted: 17.04.24)

## ÖZ

Bu çalışmada çözüme ulaştırılması istenilen başlıca sorun Türkiye’de Dijital Dönüşüm Endeksleri alanında yapılmış araştırmaları inceleyip oluşturulan çalışma ve gerekli kısıtlar hazırlandığında “Sizin firmanız dijital dönüşümün hangi seviyesinde?” sorusuna yanıt verebilmek ve bir endeks oluşturmaktır. Yerli-yabancı birçok makale taraması yapıldığında birçok farklı alanda dijital dönüşümün incelendiği görülmektedir. Bu araştırmada daha önce yapılan çalışmaların dışında, gerekli ölçütlerin belirlenip bu alanda değerlendirme parametrelerine karar verilmesi ve çok kriterli karar verme yöntemlerinden sırasıyla AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), Best- Worst (En iyi-En kötü) ve DEMATEL Yöntemleri kullanılması amaçlanmıştır. AHP yöntemi uygulanırken Super Decisions programı, Best-Worst ve DEMATEL Yöntemleri için ise Microsoft Excel yazılımı kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dijital Dönüşüm, Endeks, Dijitalleşme, Çok Kriterli Karar Verme.

## EVALUATION OF DIGITAL TRANSFORMATION INDEX PARAMETERS WITH MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHOD

### ABSTRACT

The main problem that is trying to find solution in this study to examine the indices created in Turkey and work with the necessary digital transformation tit-prepared, “the digital transformation of your company at which level?” to give the ability for finding an answer to the question and create an index. When many domestic and foreign researches are studied, the decision will be seen as the digital transformation is examining at many different fields. The research was completed in the structure of determining necessary criteria that are intended to be performed differently from other studies from this study and deciding on the evaluation parameters in this field and creating a digital transformation index using 3 of the multi-criteria decision-making techniques. The mentioned 3 MCDM methods, AHP (Analytical Hierarchy Process), Best-Worst and DEMATEL Methods were used respectively. While the AHP method was applied, a package program called Super Decisions was used, and Microsoft Excel was used for the Best - Worst and the DEMATEL Methods.

**Keywords:** Digital transformation, Index, Digitalization, Multi-Criteria Decision Making.

### 1. GİRİŞ

Bu araştırmanın amacı Türkiye’de şirketlerin ve firmaların dijital dönüşümde hangi aşamada olduğunu anlamaya yönelik bir endeks hazırlamaktır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak tüketici beklentilerindeki değişimler,

üretim ve pazarlama kuruluşlarının çalışma yöntemlerinde, kurumsal yapılarında ve satış ve satış sonrası işlemlerinde gün zaman ilerledikçe yeni gelişmeler sürdürülmektedir. Teknolojiye bağlı olarak yaşanan bu gelişmeler “dijital dönüşüm” olarak tanımlanabilir [1].

Literatür araştırmasında incelendiği üzere yapılan endeks çalışmaları her ne kadar başarılı olsa da bu çalışmada elde edilmek istenen ve bu yapılan çalışmaların dışında her firma veya şirketi dijital dönüşüm değerlendirmesi için bir endeks hazırlayarak dijital dönüşüm ölçütlerini açıkça belirtmek ve dijital dönüşüm seviyelerini ortaya çıkartmak için hangi ölçütlerin değerlendirmeye alınacağını belirlemektir. Hazırlanan endeks Türkiye’de her kurumun dijital dönüşümdeki düzeyini öğrenme ve bu bilinçle hareket etme bilincine sahip olabilmesi için kullanılacaktır. Daha önce yapılmış araştırmalar incelendiğinde firma bazında bir dijital dönüşüm endeksi hazırlandığı ve bu çalışmaların yapılmak istenen çalışma ile yeterince örtüşmediği görülmektedir [2-3]. Bu çalışmada amaçlanan endeks hazırlandığında hemen hemen her kurumun kendini dijital dönüşümde bulabilmesi için bir olanak sağlayacak olup Türkiye’nin dijital dönüşüm bilincinin kurumlar kapsamında öğrenilmesi ve yeniliğe açık hale getirilmesi Türkiye dijital dönüşüm düzeyini yükseltecektir. Burada düzey olarak bahsedilen kavram aslında dijital olgunluk kavramıdır [4]. Bu çalışmada kurumsal her yapının dijital olgunluk seviyelerinin ölçülmesi için gerekli ölçütlerin kullanılan 3 tane çok kriterli karar verme yöntemi ile matematiksel modellemeye dayalı kriterlerin çıkartılması hedeflenmiştir. Ölçüm için alt kriterler çeşitli makalelerden referans ile değerlendirmeye alınmış olup bazı alt kriterler uzman görüşler desteği ile eklenmiştir. Uzman görüşlerden alt kriter desteği alınmasının sebebi bazı önemli alt kriterlere diğer araştırma ve makalelerden erişilememesidir. Kriter ve alt kriterlere Çizelge 1’de yer verilmiştir. Belirlenen alt kriterler alanlarına, içerdikleri bilgi detaylarına ve niteliklerine göre 3 kriter başlığı halinde listelenmiştir. Bu şekilde, kullanılan 3 tane çok kriterli karar verme yöntemlerinin matrisleri ve program üzerinden sonuçlandırılması daha kolay ve verimli olmuştur. Bu araştırmaya konunun belirlenmesinin ardından literatür araştırması ile devam edilmiş olup yöntem ve kriterlere literatür araştırması ışığında karar verilmiştir. Yöntemler ve kriterlerin belirlenmesinin ardından kullanılacak yöntemlerin uygulama adımlarına göre değerlendirilmiş olup dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi için hangi kriterler ve alt kriterlerin uygun olduğuna karar verilmiştir.

Dijital dönüşüm endeksi için karar verilen kriterler; Strateji, Mobilite ve Donanımsal Yeterlilik, (AI) Yapay Zeka – Makine Öğrenimidir.

**Çizelge 1. Kriterler ve Alt Kriterler**

STRATEJİ	MOBİLİTE VE DONANIMSAL YETERLİLİK		AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ
Dijital dönüşüm stratejisinin varlığı ve hedeflerle birleştirilme oranı	Algılama tanımlama sensörlerinin varlığı		Karar destek sisteminin kullanım oranı
Dijital dönüşüm kültürünün en az bir ekip liderinde var ve uygulanıyor olma oranı	İşletme içi faaliyetlerin dijitalleşme oranı		Karar destek sistemi simülasyon tabanlı kullanım oranı
Dijital dönüşüm faaliyetleri için sürekli bütçe payı	Geniş bant erişimi olması		Karar destek sisteminin simülasyonu otonom çalışma oranı
Yetenek açığı oranı	Bulut sistemlerinin kullanım oranı		Otomasyon sistemlerinin operasyonlarda ki kullanım oranı
Başarılı AR-GE oranı	Dijitalleşme için altyapı uygunluğu		Otomasyon süreçlerinin algoritma ve makine ile birleştirilme durumu
Sürekli iyileştirme uygulamalarının varlığı ve sürdürülmesi	İnternete mobil bağlantı için taşınabilir cihazlar kullanılması		Yönetimde karar destek sistemlerinin kullanım oranı
Çalışanların teknoloji kullanım becerisi	Kesintisiz internet ve hızı		ERP kullanım oranı
	Veri toplama sistemlerinin var olması		Büyük veri ve analitik çözümlerin varlığı

Dijital dönüşüm konulu endekslerde veri toplama ve anket yöntemleri kullanılmış olduğu görülmüştür [5-6]. Fakat bu yöntemler her ne kadar verimli yöntemler olsa da bu çalışmada istenilen sonuçlara ulaşmak için yeterli görülmemiştir. Anket kullanarak çalışmasını tamamlayan TÜRKONFED'in 2018 yılında hazırladığı Sektör Bazlı Dijital Dönüşüm yol haritası isimli raporu incelendiğinde otomotiv, tekstil ve hazır giyim, seracılık sektörleri bazında yapılmış bir çalışma olduğu görülmüştür. Hazırlanan bu çalışmada tüm sektörleri kapsamı ve her sektörün dijital dönüşüm, inovasyon gibi kilit konulara değinilmesi dijital dönüşüm endeksi araştırmasına yön vermiştir. SEDEFED Yönetim Kurulu Başkanı Ali Avcı'nın dijitalleşme hayatın her aşamasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda dijitalleşme olgusu ülkemizin stratejik sektörlerini önceliklendirme ile ekonomik kalkınmayı hızlandırmak için kullanılabilir bir araç olarak değerlendirilebilir. Dijitalleşmenin sağladığı kolaylıklar yardımıyla uzmanlık alanları ve rekabet şartları geliştirilerek sektörlerin verimliliğine ve üretkenliğine olumlu katkılar sağlanabileceği [1] şeklinde yaptığı yorum dijitalleşmenin ülkemiz açısından önemini yeterince vurguladığı görülmektedir.

Bu hususta ülkemizin attığı önemli adımlardan biri olan T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi 2018 yılında kurulmuştur. Kurulan bu ofis dijital dönüşüme öncülük etmektedir. Fakat dijitalleşmenin dünya çapındaki önemi hatırlandığında tüm kurumlar dijital dönüşüm bilincinde olmadığı sürece dijitalleşme için atılan adımlar yetersiz kalacaktır. Dijitalleşme için kurum ve kurum liderlerinin bilinçli olmasının yapılması gereken tüm adımların en başında geldiği düşünülmektedir. Bahsedilen bu bilinç oluşturulduğunda atılması gereken bir diğer adım dijital dönüşüme teşvik için karı artırabilecek bir dijital strateji geliştirmek önemlidir ve bu dijital strateji haritası işletme yönetimi, dijital iş sürecinden oluşur [7]. Dijital işletme yönetimi her kurum tarafından benimsenebilecek bir adımdır. Bu kurumların sektörleri de göz önüne alınarak stratejik haritalar ile çizilen bu yol eksiksiz bir şekilde tamamlandığında dijitalleşme için önemli bir adım atılmış olacaktır [8-9]. Ayrıca işletmeler vizyonu tamamlamak, yeni teklifler sunmak,

temel iş süreçlerinin güçlendirilmesi, güçlü bir dijital temel oluşturmalıdır [10].

1968 yılında bulunan AHP yöntemi, Saaty tarafından 1977 yılında karar verme problemlerini çözülmesinde kullanılabilir bir metod olarak geliştirilmiştir. Günümüzde AHP, nitel ve nicel kıstasları karar almada bir arada değerlendirebilen ve çözümlenmesini sağlayan bir çok kriterli karar verme yöntemidir. Hiyerarşik sıralama AHPde en az üç düzeyde oluşturulur. En üst düzeyde amaç, onun altında ana ölçütler ve en alt düzey de de varsa alt ölçütler yer alır. AHP, çok sayıda ölçüt ile uygulanabilir. Hiyerarşinin ve ikili karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasında kişisel görüşlerin etkili olması nedeniyle konuyla ilgili ve deneyimli uzman kişilerin görüşlerine ihtiyaç vardır [9].

Kriter ve alt kriterler En İyi-En Kötü yöntemi yardımıyla değerlendirilmiştir. Bu yöntemin kullanılmasında en iyi ve en kötü kıstasların öncelikli seçimindeki tutarsızlıkların çok az etkili olması neden olmuştur[11]. BWM'nin yaygın kullanılan iki versiyonu vardır; Doğrusal olmayan BWM ve Doğrusal BWM. Bu çalışmada Doğrusal BWM kullanılmıştır. Tutarlılık kontrolü Liang, Brunelli, Rezaei'ye dayanmaktadır. BWM kullanılırken Jafer Rezaei'in oluşturduğu Microsoft Excel formatı kullanılmıştır [12].

BWM Yöntemi; kurumsal kaynak planlama sistemlerinin seçimindeki kriterlerin belirlenmesi, personel seçim sürecinde kullanılan kriterlerin değerlendirilmesi, finansal piyasalarda blockchain teknolojisinin benimsenmesinde kritik faktörlerin değerlendirilmesi gibi çalışmaların yöntemi olarak kullanılmıştır.

1972 ve 1976 yılları arasında Cenevre Battelle Memorial Institute, Science and Human Relations programının geliştirdiği DEMATEL Yöntemi; girift ve karmaşık problem gruplarına çözüm arayan araştırmacılar tarafından kullanılmasını amaçlamaktadır [13].

DEMATEL yöntemi, pazarlama stratejileri, e-öğrenme değerlendirmeleri, havayollarında emniyet yönetim sistemleri, hisse senedi yatırımları, bilgi güvenliği riskleri, teknoloji parklarının gelişimi, yatırımlarda portföy seçimi gibi alanlarda uygulanmıştır [14]. Bu

çalışmada DEMATEL Yöntemi Microsoft Excel üzerinden ölçeklendirilmiş kriter ve alt kriterler ile matematiksel modelleme kullanılarak sonuçlandırılmıştır.

Kullanılmasına karar verilen bu üç yöntemin de avantajları ve dezavantajları vardır. 3 yöntemin de ortak avantajı farklı uzman görüşlerle farklı sonuçlar elde edilecek olmanın esnekliğidir. AHP yönteminin avantajları; kolay uygulanabilir olmasıdır anlaşılması kolay olmakla birlikte uygulaması da oldukça basittir. Yine AHP yönteminin dezavantajı sık sık yineleme yaşandığı için uygulamada sıkıcılaşabilir. Bu aşamada Super Decisions isimli program kullanıldığında işlem daha kolay hale gelebilir. Best-Worst yönteminin avantajı yine kolay uygulanabilir olmasıdır. Çünkü excelde çözüldürülür, çok fazla uğraş gerektirmez. Yine best-worst yönteminin dezavantajı excelle girilen önem derecelerinin tutarsız şeklinde belirlenmesi ile başlar. Tutarlı hale getirmek için uzman görüşlerinin yenilenmesi gerekebilir, bu da daha çok zaman alacağından verimli olmayabilir. DEMATEL yönteminin derecelendirilmesi diğer iki yöntemle göre farklıdır ve 5 derece içerir. Uygularken işlem yoğunluğu bazen kafa karışıklığı yaratabilir. Uygulama yine excelde yapılır. Excelde uygulanan tüm yöntemler excel bilinen bir format olduğu için kolaylık sağlamakla birlikte manuel olarak uygulamak gerektiğinde işler bir süre sonra sarpa sarabilir ama çözücü kullanılma durumunda işlem kolaylaşır. Best-Worst yöntemi uygulanırken çözücü kullanılması avantaj olarak sayılabilirse bu sebeple DEMATEL yöntemi kullanılırken manuel olarak sadece bir iki excel işlevi kullanılarak uzun uzun yöntem uygulanması bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Sonuçlandırmak gerektiğinde excel bazen avantaj bazen dezavantaj durumunda yer alabilir. Tıpkı AHP yönteminde farklı bir uygulama olarak Super Decisions'ın kullanılmasının avantaj veya dezavantaj olarak farklı yorumlanabilecek oluşu gibi.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyularak belirlenen kriterler ve alt kriterlerin ağırlıklandırılması için ilk adımda AHP yöntemi kullanılmıştır. AHP Yönteminin adımları şu şekilde gösterilebilir [15];

*1.Adım:* Karar problemi hatasız bir şekilde tanımlanır.

*2.Adım:* Kriter, alt kriter ve alternatifleri içeren bir hiyerarşik yapı oluşturulur.

*3.Adım:* Uzman görüşlerin kullanılması açısından ikili karşılaştırma matrisleri Excel üzerinden oluşturulur [10]. Bu matrisleri oluştururken Çizelge 2'de verilen Saaty 1-9 Karşılaştırma Ölçeği kullanılır.

**Çizelge 2. Saaty 1-9 Kıyaslama Ölçeği [10]**

Önem Derecesi	Tanım
1	Eşit önem derecesi
3	Orta önem derecesi
5	Kuvvetli önem derecesi
7	Çok kuvvetli önem derecesi
9	Mutlak önem derecesi
2,4,6,8	Ara değerler

*4.Adım:* Bu seviyede, uzman görüşlerin doldurduğu ikili karşılaştırma matrisleri tutarlılık oranları bazında kontrol edilir. İlk olarak Eşitlik (1) kullanılarak tutarlılık katsayısı hesaplanır.

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

Eşitlik (2) yardımıyla tutarlılık oranı hesaplanır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

CR <0,10 olmalıdır, değilse matrisler kontrol edilmelidir. Çizelge 3'te verilen RI değerleri kriter sayısına göre seçilerek CR değerlerinin bulunması için kullanılır.

**Çizelge 3. Rassal Index (RI) [10]**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

*5.Adım:* Var olan bütün bileşenler için öncelik vektörleri hesaplanarak bulunan değerler birleştirildikten sonra, ikili karşılaştırma matrisinin satırları toplanarak normalize edilmek için tüm satırların toplamına bölünür.

Bu hesaplamaları yapmak için, negatif kriterlerin çarpıma göre ters işaretlileri alınır.

*6.Adım:* Değerlendirilen kriterlerin öncelik değerleri ile alternatiflerin öncelik değerleri çarpılıp toplanarak birleştirme işlemi yapılır. Sonuçlardan en büyük değeri olan alternatif seçilir.

## 2.2. Best – Worst Yöntemi

Rezaei tarafından geliştirilen bu yöntemin adımları aşağıdaki adımlarla özetlenebilir [16];

*1.Adım:* Bir dizi karar kriterlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu adımda uzman görüşler, kullanılacak n kriterini ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) seçmektedir.

*2.Adım:* En iyi ve en kötü kriterleri seçmektir.

*3.Adım:* Seçilen en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre tercih oranı 1 ile 9 arasında bir sayı kullanarak Eşitlik (3) şeklinde belirlenir.

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (3)$$

*4.Adım:* Diğer kriterlerin en kötü kriter üzerindeki göreceli önemi uzman görüşlerce 1-9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenir. Bu adımın sonunda diğerlerinden en kötü olan vektör Eşitlik (4) gibi olmalıdır:

$$A_B = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (4)$$

*5.Adım:* Bu seviyede amaç optimal değerleri belirlemektir. Eşitlik (5),(6), (7), (8), (9), (10), (11), (12)' de verilen şekilde eşitliklerin sırayla uygulanması aşamasıdır.

$$\min \max \{I w_B - a_{Bj}I, W_jI, IW_j - a_{jw} \cdot W_wI\} \quad (5)$$

$$\sum w_j = 1 \quad (6)$$

$$W_j \geq 0, \text{ tüm } j\text{'ler için} \quad (7)$$

$$\min \xi^L \quad (8)$$

$$I \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj}I \leq \xi, \text{ tüm } j\text{'ler için} \quad (9)$$

$$I \frac{W_j}{W_w} - a_{jw}I \leq \xi \text{ tüm } j\text{'ler için} \quad (10)$$

$$\sum w_j = 1 \quad (11)$$

$$W_j \geq 0, \text{ tüm } j\text{'ler için} \quad (12)$$

## 2.3. DEMATEL Yöntemi

DEMATEL yöntemi birbirini izleyen 5 adımın ardından elde edilen etki yönlü diyagram ile çözüme ulaşır. Bu yöntem uygulanırken kullanılan Karşılaştırma Ölçeği Çizelge 4'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** DEMATEL Yöntemi Karşılaştırma Ölçeği [16]

Değer	Tanım
0	Etkisiz
1	Az Etki
2	Orta Etki
3	Çok Etki
4	Çok Yüksek Etki

Çizelge 4'te görülen 5 dereceden oluşan ikili karşılaştırma ölçeği kullanılır.

*1.Adım:* Direkt ilişki matrisi (A)'ya bağlı olarak satır ve sütundaki en düşük değer (k) kullanılarak aşağıdaki (13) ve (14) eşitlikleri yardımıyla normalleştirilmiş direkt ilişki matrisi (M) elde edilir.

$$M = k \times A \quad (13)$$

$$k = \min \left[ \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|} \right] \quad (14)$$

*2.Adım:* Normalleştirilmiş direk ilişki matrisi (M) ve (15) eşitliği kullanılarak toplam ilişki matrisi (S) türetilir.

$$S = M + M^2 + M^3 + \dots = \sum M^1 = M \cdot (1 - M)^{-1} \quad (15)$$

*3.Adım:* Gönderici grubu ve alıcı grubu hesaplanması, S matrisinin sütunlar toplamı (R), ve S matrisini satırlar toplamı (D) hesaplanır. (16) eşitliğinin hesaplamasının ardından (17) ve (18) eşitliklerinin hesaplanarak D-R ve D+R değerleri kullanılır ve her bir kriterin diğerlerine olan etki seviyesi ve diğerleriyle ilişki seviyesi belirlenir.

$$S = S_{i,j} \quad (16)$$

$$D = \hat{a}^s i, \quad j=1 \quad (17)$$

$$R = \hat{a}^s i, j \quad j=1 \quad (18)$$

4. Adım: Ağırlıkların hesaplanması, son adımda elde edilen değerler kullanılarak (19) ve (20) numaralı eşitliklerle ağırlıklar bulunur.

$$w = \{(D + R)^2 + (D - R)^2\}^{1/2} \quad (19)$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (20)$$

### 3. DENEYSEL BULGULAR

Öncelikle belirlenen kriterlerin ne demek olduklarını yapılan literatür taraması öncülüğünde özetlemek gerekirse;

*1.Strateji:* Dijital dönüşüm kurumlarda büyük bir değişime neden olduğu için kurumlar bütün dijital dönüşüm sürecini tamamlayıcı bir dijitalleşme stratejisine gerek duyar. Her kurumun belirlediği alanda olgunlaşması için gereken düzey kendi iş stratejisine göre değişmektedir. ‘Kurumun veya kurum liderinin iş için genel odak noktası nedir? Kurumumu bu konuda nasıl yapılandırmalıyım?’ sorularını kendisine sorması gerekir [17].

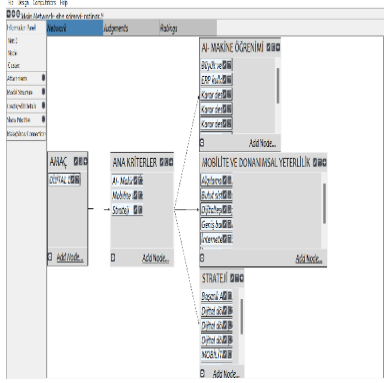
*2.Mobilite ve Donanımsal Yeterlilik:* Mobilite, bir yerden bir yere gidiş veya bir durumdan başka bir duruma geçiş anlamında kullanılmaktadır. Günümüz Dünyasında her kavram artık bu temel gerçeklikten kaynaklanmaktadır. Mobilite sayesinde teknolojinin hızına yetişebilmek artık çok olağan sayılmaktadır. Her geçen gün daha da hız kazanan günlük yaşam alışkanlıkları ve iş yaşamının gereklilikleri mobilite kavramının geliştirilmesi ile kontrol altına alınabiliyor. Her gün iş yerine ulaşmak ve geri dönmek için harcanan enerji ve zaman geri kazanılabiliyor ve sevdiğimiz görmek için kilometrelerce yol kat etmemize gerek kalmıyor [18]. Donanımsal yeterlilik, işletme içi faaliyetlerin dijitalleşmesi için oluşturulmuş olup mobilite ile aynı başlıkta incelenebilir olduğundan tek kriter adında birleştirilmiştir. Donanımsal yeterlilik, kurumun kendine özgü özellikleri bakımından gerekli olan niteliklerdir.

*3.AI – Makine Öğrenimi:* Tarım makineleri üreticisi John Deere’in son yıllarda dijital dönüşüm yolunda büyük çatlamlar içinde olduğu görülmektedir. Personel alımında kalifiye çalışanları işe almak ve başarılı nitelikli çalışanları ile yola devam etmek amacıyla kariyer programlarında gerekli değişiklikleri yapmıştır. Sürdürülen operasyonlara çiftliğin otonom izlenmesi, yapay zekâ ve makinelere derin öğrenme sistemlerinin uygulanması, sağlıklı bitkilerin belirlenmesi ve oluşan ve oluşacak sağlıklı ürünler için gerekli işlemlerin uygulanması gibi teknolojik yatırımlar yapılarak rekabet gücü artırılmış sektörde farklı bir yer kazanmıştır. Bunun yanında yapay zekâ uygulamaları ile tesis verimliliği ve rekabet gücü arttırmış, zaman içinde hurda oranını transfer dökümünü tahmin etmek ve yarı mamul ürünlerin kalitesini öngörmek ve bir sonraki üretim aşamasını tespit etmek amacıyla makine öğrenimi ve derin öğrenmeden yararlandıkları görülmektedir [19]. Gelişmiş makine öğrenimi modelleri, şirketlerin kalıpları verimli bir şekilde keşfetmesine, tahminler yapmasına ve kararlar almasına ve giderek daha fazla kurumsal performansın temel itici güçleri haline gelir [20]. Ayrıca bu kriter karar destek sistemlerini de kapsamaktadır.

#### 3.1. AHP

Uygulanmaya başlarken önce hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Bu çalışmada amaç dijital dönüşümde kullanılacak kriterlerin ve önem derecelerinin belirlenmesi olduğu için alternatif yoktur. Aslında alternatifler belirlenen kriterlerdir. Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra ikili karşılaştırma matrisleri belirlenmiş olup 3 uzman görüşü tarafından oluşturulan matrisler doldurulmuştur. Daha sonra 3’er tane elde edilen 4 matrisin geometrik ortalaması Çizelge 5’te görüldüğü üzere Excel üzerinden alınmıştır. Uzman görüşler ikili karşılaştırma matrislerini doldururken Saaty 1-9 ölçeğini kullanmışlardır. Yapılan bu adıma kadar tüm süreç Excel üzerinden ilerlemiş olup ağırlıkların belirlenmesi ve tutarlılık oranlarının hesaplanmasını içeren adımlar SuperDecisions isimli paket program üzerinden yapılmıştır. Şekil 1’de görülen hiyerarşik yapı model olarak tanımlanmıştır. Kriterlerin ve alt kriterlerin ilişkileri birbirine bağlanmış ve model verileri işlemeye hazır hale gelmiştir. Daha sonra Judgments sekmesinde ikili karşılaştırma

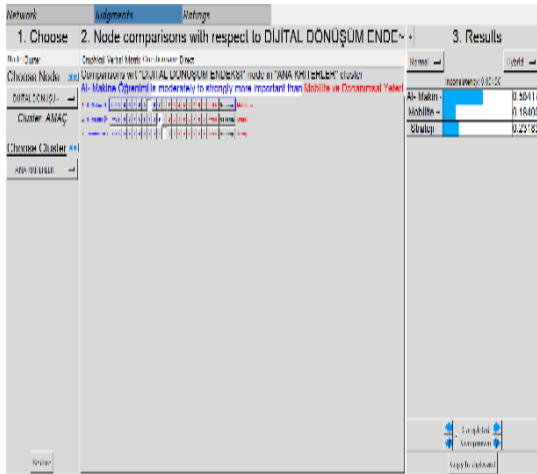
matrislerindeki verileri girmek için bağlantılar yapıldıktan sonra programın oluşturduğu karşılaştırmalar Şekil 2’de görüldüğü gibi manuel olarak yapılmıştır. Karşılaştırmalara ait sonuçlardan biri Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 1. AHP Modeli

Çizelge 5. Kriterlerin Geometrik Ortalamalarını İçeren İkili Matris

KRİTER MATRİSİ	MOBİLİTE VE DONANIMSAL YETERLİLİK	AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	STRATEJİ
MOBİLİTE VE DONANIMSAL YETERLİLİK	1	0,25	0,71
AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	4,33	1	2
STRATEJİ	1,4	0,5	1



Şekil 2. AHP, AI – Makine Öğrenimi Kriterinin Alt Kriter Karşılaştırmaları

3. Results		
Normal	Hybrid	
Inconsistency: 0.05156		
AI- Makin~		0.58417
Mobilite ~		0.18400
Strateji		0.23183

Şekil 3. AHP, Kriter Ağırlıklandırma Sonuçları

### 3.2. Best – Worst

Bu yöntemi geliştiren Rezaei’in yöntemin adı ile açtığı bestworstmethod.com isimli web sitesinde yer alan En İyi-En Kötü Excel formatı kullanılmıştır. İlk adım olarak 3 kriter bulunduğu kriterlerin kendi aralarında ağırlıklandırılması için Criteria (C)=3 sayfasına istenilen veriler girilmiş, Şekil 4’te gösterilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6’da verilen çözücü eklentisi ile Şekil 7’de görüldüğü gibi sonuçlandırılmıştır. Bahsedilen çözücü eklentisi tüm karşılaştırma sayfalarında kullanılmıştır. Daha sonra tüm kriterlerin alt kriterler ağırlıklandırmaları yapılmıştır. Strateji Kriteri için C=7, Mobilite ve Donanımsal Yeterlilik kriteri için C=7 ve son olarak AI – Makine Öğrenimi için C=8 sayfaları kullanılmıştır. Bahsedilen C değerleri kriterin alt kriter sayısını ifade etmektedir. En İyi-En Kötü yönteminin sonuçlarını özetlemek gerekirse, öncelikle sonuç sayfalarında ‘The pairwise comparison consistency level is acceptable’ yazması gerekmektedir. ‘Acceptable’ değil de ‘not acceptable’ yazarsa sonuç tutarsız demektir. Yapılan tüm karşılaştırma işlemlerinde yine Saaty 1-9 ölçeği kullanılmıştır. AHP yöntemi ile aynı karşılaştırma ölçeği kullanıldığından dolayı aynı uzman görüşler ve geometrik ortalamaları kullanılmıştır. Tüm sonuçlar ‘acceptable’ çıktığı için ağırlıklandırmaları tutarlıdır.

	A	B	C	D	E
1					
2		Criteria Number = 3	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3
3		Names of Criteria	Strateji	Mobilite ve	AI-Makine Ö
4		Select the Best	AI-Makine Ö		
5		Select the Worst	Mobilite ve		
6					
7		Best to Others	Strateji	Mobilite ve	AI-Makine Ö
8		AI-Makine Ö	2	4	1
9		Others to the Worst	Mobilite ve		
10		Strateji	2		
11		Mobilite ve DY	1		
12		AI-Makine Ö	4		
13					
14					
15					
16					

Şekil 4. BWM, Kriter Ağırlıklandırma için Veri Giriş Sayfası

Çözücü Parametreleri

Hedef Ayarla:

Hedef:  En Küçük  En Büyük  Değer:

Değişken Hücreleri Değiştirerek:

Kısıtlamaları Bağlıdır:

Karşılaştırmalı Değişkenleri Pozitif Yap

Çözüm Yöntemi Seçin:

Çözüm Yöntemi  
 Doğru değilse, Doğru olmayan Çözümler için Doğrusal Olmayan altyapısını seçin. Doğrusal Çözümü  
 Problemler için Basit LP altyapısını seçin ve doğru olmayan Çözümler için Açılım altyapısını seçin.

Şekil 5. Çözücü Eklentisi-1

Çözücü Sonuçları

Çözücü bir çözüm buldu. Tüm Kısıtlamalar ve uygunluk koşulları karşılandı.

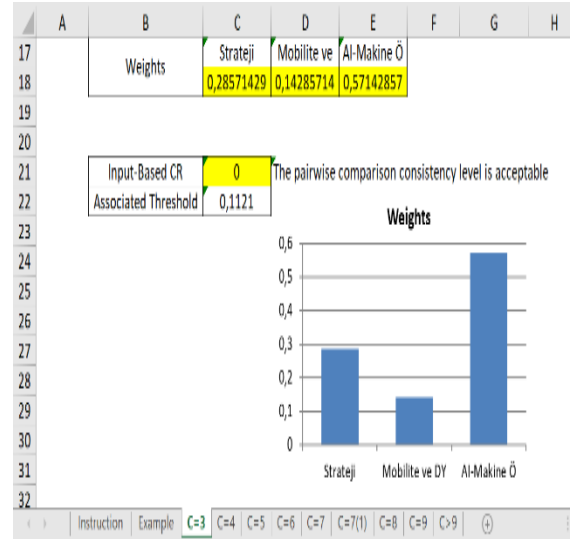
Çözücü Çözümünü Sakla  Özgün Değerleri Geri Yükle

Çözücü Parametreleri İletişim Kutusuna Dön  Ana Hat Raporları

Raporlar  
 Yanıt  
 Duyarlılık  
 Limitler

Çözücü bir çözüm buldu. Tüm Kısıtlamalar ve uygunluk koşulları karşılandı.  
 GRG altyapısı kullanıldıysa, Çözücü en az bir yerel en uygun çözüm bulmuştur. Basit LP kullanıldıysa, bu, Çözücü'nün bir genel en uygun çözüm bulunduğu anlamına gelir.

Şekil 6. Çözücü Eklentisi-2



Şekil 7. BWM, Kriter Ağırlıklandırma Sonuç Sayfası

### 3.3 DEMATEL

Excel üzerinden uygulanmış olup yine kriter ağırlıklandırmasını elde etmek amaçlanmıştır. DEMATEL yönteminde 4. Adım sonunda bulunan grafik oluşturma kısmı yapılmamıştır. Bu çalışma amaçlarından biri kriter ağırlıklandırması yapmak olduğu için grafikte elde edilecek olan kriterler arası etki yönünün bulunmasına gerek duyulmamıştır. DEMATEL yöntemi Excel'de klasik Excel kullanılarak yapılan yöntem literatür araştırması desteği ile uygulanmıştır. Uzman görüşler 1-4 ölçekli derecelendirme tablolarını doldurduktan sonra adımlar uygulanmaya başlanmıştır. Adımları özetlemek gerekirse; ilk olarak uzman görüşlerden alınan ve Çizelge 6'da görülen A matrisleri oluşturulmuştur. M matrisi satır toplamlarını içeren matristir ve Çizelge 7'de görülmektedir. Tüm hücrelerin toplamlar arasında en büyük toplama bölünmesi ile elde edilen matris ise Çizelge 8'e görülen S matrisidir. 3. Adıma geçilmiş olunur. Çizelge 9'da verilen ve birim matris olan I matrisi ile Çizelge 10'a verilen S matrisinin farkı alındığında 4. adıma geçilmiş olunur. Çizelge 11'de verilen D değeri satır toplamlarını, Çizelge 12'de verilen R değeri ise sütun toplamlarını ifade eder. D ve R değerlerinin bulunmasının ardından Çizelge 13'te görülen D+R ve D-R değerleri hesaplanır ve en son ağırlıklar bulunur. Kriterler için yapılan ağırlıklandırma analizinin tüm adımları diğer kriterler ve alt kriterleri için de uygulanmıştır.



**Çizelge 6. D, Kriterler Arası Derecelendirme**

KRİTER MATRİSİ	MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	STRATEJİ
A MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	0	1	1
AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	4	0	2
STRATEJİ	2	1	0

AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	0,67	0	0,35	6
STRATEJİ	0,33	0,17	0	3

**Çizelge 9. D, I Birim Matrisi Çizelge 8. D, Kriterler için (I-S Matrisi)**

I	1	0	0	I-S	1,00	-0,17	-0,17
I	0	1	0	I-S	-0,67	1,00	-0,35
I	0	0	1	I-S	-0,33	-0,17	1,00

**Çizelge 10. D, Kriterlerin S Matrisi için Son İşlem Adımı**

(1-S) <sup>-1</sup>	1,27	0,26	0,30
(1-S) <sup>-1</sup>	1,06	1,28	0,62
(1-S) <sup>-1</sup>	0,60	0,30	1,20

**Çizelge 7. D, Kriterler için M Matrisi**

KRİTER MATRİSİ	MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	STRATEJİ	toplam
MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	0	1	1	2
AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	4	0	2	6
STRATEJİ	2	1	0	3

**Çizelge 11. D, Kriterler için S Matrisindeki Satır-Sütun Toplamları**

				D
S	0,27	0,26	0,30	0,84
S	1,06	0,28	0,62	1,96
S	0,60	0,30	0,20	1,10
R	1,93	0,84	1,12	

**Çizelge 12. D, Kriterlerin D+R ve D-R Değerleri**

D	R	D+R	D-R
0,84	1,93	2,78	-1,09
1,96	0,84	2,80	1,11
1,10	1,12	2,23	-0,02

**Çizelge 13. D, Kriterlerin Ağırlıkları****Çizelge 8. D, Kriterler için S Matrisi**

KRİTER MATRİSİ	MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	AI-MAKİNE ÖĞRENİMİ	STRATEJİ	toplam
S MOBİLİTE VE DONANIM SAL YETERLİLİK	0	0,17	0,17	2

(D+R) <sup>2</sup>	(D-R) <sup>2</sup>	(D+R) <sup>2</sup> + (D-R) <sup>2</sup>	KAREKÖK	AĞIRLIKLAR	KAREKÖK/TOPLAM KAREKÖK	KRİTER İSİMLERİ
7,75	1,19	8,95	2,99	0,36		MOBİLİTE
7,87	1,24	9,11	3,01	0,36		AI-MAKİNE
5	0	5	2,23	0,27		STRATEJİ
T			8,24			

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucu, amacı doğrultusunda düşünüldüğünde elde edilen veri ve bulgular dijitalleşme süreci için pozitif yönde ilerleme sağlayacak niteliktedir. 3 farklı yöntem kullanılarak çalışmaya 3 farklı bakış açısı kazandırılmıştır. Kullanılan yöntemlerin üçünü de uygulamaya başlarken uzman görüş yorumlarına dayanarak elde edilen derecelendirmeler kullanılmıştır. Tüm kriter ve alt kriterler baz alınarak farklı yöntemlerle farklı sonuçlar alındığından yöntem çokluğunun yorum çokluğu anlamına geldiği varsayımı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak AI – Makine Öğreniminin ve altında barındırdığı diğer etkenlerin dijital dönüşümde büyük ölçüde etkili olduğu açıkça görülmektedir. Dijital dönüşüm etmenleri olarak belirlenmiş olan örneğin, yetenek açığı oranı ve dijital dönüşüm kültürünün en az bir ekip liderinde var ve uygulanıyor olma oranı alt kriterlerinin önem derecelerinin eşit olduğu belirlenmiştir. Alt kriterlerin önem derecesinin eşit olma durumu tüm kriterlerin uygulanan farklı yöntem sonuçlarında da görülmektedir. 3 farklı yöntem kullanılmasının temel sebeplerinden biri her yöntemde farklı sonuçlar çıkabilecek oluşudur. Nitekim kriter önem derecelerinin analiz sonuçları olarak AHP ve Best – Worst yöntemlerinde 2. Sırada Strateji, 3. Sırada Mobilite ve Donanımsal Yeterlilik bulunurken DEMATEL yönteminde 2. Sırada Mobilite ve Donanımsal Yeterlilik 3. Sırada ise Strateji bulunmaktadır. Bu analizin sonucunda farklı ağırlıklandırma ve derecelendirme yöntemlerinin aynı kriterler ve alt kriterler üzerinde uygulanması her açıdan yararlı olacaktır. AHP ve Best – Worst yöntemlerinde çoğunlukla aynı sonuçların elde edilmesi ve bu durumun üzerine DEMATEL yöntemiyle farklı yorumların analize dahil edilmesi bu çalışma açısından çok yönlü bir bakış oluşturmıştır. Dijital dönüşüm sürecinde karar vericilerin etkenleri ve analiz yöntemlerini belirlerken en az 3 farklı yöntem ile karara varılması kurum açısından daha faydalı bir yol olacaktır. Bu çalışma sonucunda dijital dönüşüme ayak uydurmak isteyen kurumların öncelikli yapması gereken adım AHP ve Best – Worst yöntemlerine göre karar destek sistemlerinin kullanılması, kullanmakla kalmayıp simülasyon tabanlı uyguluyor olmaları gerekmektedir. Karar destek sistemlerinin algoritma ve makine ile birleştirilmesi de

önemli rol oynamaktadır. Ayrıca DEMATEL yöntemine göre ise öncelikli adım ERP kullanımıdır. Kurumların yapması gerekenlerin başında tüm yöntem sonuçlarına göre AI – Makine Öğrenimi konusunda gelişim göstermek için gerekli çalışmaları yapmak dijitalleşmede kurumu ileri taşıyacaktır.

Her kurum için dijital dönüşüm kaçınılmaz bir sondur ve dijitalleşme sürecine bir an önce adapte olmak hem kurum bünyesinde hem de Türkiye dijital dönüşüm seviyesinin bir adım daha ileri taşınması açısından önemli bir rol oynar. Kurumların dijitalleşmesi, kurum bünyesinde büyük bir adım olarak görülmesi de dijitalleşen kurumların yüzdesi arttıkça Türkiye genelinde dijital dönüşüm süreci büyük ölçüde yol kat etmiş olacaktır.

#### KAYNAKLAR

1. Türkonfed, Sedefed, Türkonfed ve Sedefed Dijital Anadolu Raporu Yayınlandı, <https://turkonfed.org/tr/detay/1618/turkonfed-ve-sedefed-dijital-anadolu-raporu-yayimlandi/>, Kasım 14, 2022.
2. Abdullah Ballı, “Türkiye’de Dijital Dönüşüm ve Girişimcilik”, 3. Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi, Cilt 57, Sayı 1, Sayfa 251-279, 2022.
3. Emre Gökşin, “Dijital Pazarlama Temelleri”, 16, Abaküs Yayınları, İstanbul, 2017.
4. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/19.5.1.pdf>Teichert, 2019: 1675
5. Bekir Pekdemirli, <https://turkonfed.org/tr/detail/1950/dijital-anadolu-2-sektor-bazli-dijital-donusum-yol-haritasi>, Dijital Anadolu 2: Sektör Bazlı Dijital Dönüşüm Yol Haritası, Kasım 11, 2022.
6. Eylem Çetinkaya “İmalat Sanayinde Dijital Dönüşüm: Trakya Bölgesinde Bir Saha Araştırması” Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, 2021.
7. Ismail, M. H., Khater, M., & Zaki, M. (2017). Digital business transformation & strategy: What do we know so far. Cambridge Service Alliance, 10(1), 1-35.A Strategic Map for Digital Transformation, Shuichiro Yamamoto
8. Thomas Hess, Alexander Benlian, Florian Wiesböck, Christian Matt, Dijital Dönüşüm Stratejisi Oluşturma Seçenekleri, MIS Quarterly Executive, Vol. 15, Issue 2, Pages 103-119, 2016.

9. Justin Rose , Vladimir Lukic , Tom Milon, Alessandro Cappuzzo, Sprinting to Value in Industry 4.0., <https://www.bcg.com/publications/2016/lean-manufacturing-technology-digital-sprinting-to-value-industry-40> , Kasım 17, 2022.
10. Erdem Aksakal, Melis Dağdeviren, “ANP ve DEMATEL Yöntemleri ile Personel Seçimi Problemine Bütünleşik Bir Yaklaşım”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 4, Sayfa 911, 2010.
11. Engin Çakır, Melih Can, “Best-Worst Yöntemine Dayalı ARAS Yöntemi ile Dış Kaynak Kullanım Tercihinin Belirlenmesi: Turizm Sektöründe Bir Uygulama”, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt 23, Sayı 3, Sayfa 1273-1300, 2019.
12. Talip Arsu, Şerife Uğuz Arsu, “Personel Seçim Sürecinde Kullanılan Kriterlerin Best-Worst Metodu (BWM) ile Değerlendirilmesi” Cilt 56, Sayı 3, Sayfa 1949-1967, 2021.
13. Fontela, E. & Gabus, A. (1974). DEMATEL, innovative methods, technical report no. 2, structural analysis of the world problematique. Battelle Geneva Research Institute, Geneva.
14. Ünal Battal, "Türkiye’de Havayolu Taşımacılığının Finansman Sorunları: DEMATEL Yöntemi Uygulaması." Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 11, Sayı 2, Sayfa 96-111, 2018.
15. Gizem Sarıçalı, Nilten Kundakçı, “AHP ve COPRAS yöntemleri ile otel alternatiflerinin değerlendirilmesi”, International Review of Economics and Management, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 45-66, 2016.
16. Dr. Thomas Kofler, Digitale Transformation in Unternehmen. ZD. B Digital Dialogue Positionspapier, 2018
17. Müge Klein, “İşletmelerin Dijital Dönüşüm Senaryoları-Kavramsal Bir Model Önerisi”, Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt 19, Sayı 74, Sayfa 997-1019, 2020.
18. Mobilite Nedir, Mobilitenin Hayatımızdaki Önemi Nedir?, <https://blog.toyota.com.tr/mobilite-nedir-mobilitenin-hayatimizdaki-onemi-nedir>, Kasım 11, 2022.
19. Deniz Merdin, Dijital ve Yeşil Tedarik Zinciri Sürecinde Analitik Modelleme ve Karar Destek Sistemi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2022
20. Deloitte, Teknoloji Trendleri 2021, <https://www2.deloitte.com/tr/tr/pages/consulting/digital-disruption-index.html>Deloitte, Insights; Tech Trends 2021. , Kasım 16, 2022