



Cilt:7 Sayı:2 Volume:7 Number:2 ISSN:2602-3350

2023

DergiPark
AKADEMİK

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

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

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

I3DPTDI – 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. **I3DPTDI** 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

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

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

Cilt:7 Sayı: 2 Yıl: 2023

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

Volume:7 Number: 2 Year: 2023

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: 7, No:2 (2023)

Cilt: 7, Sayı:2 (2023)

Editörler ve Kurullar / Editors and Boards

Yayın Kurulu Başkanı / Publication Board Manager

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

Baş Editör / Editor-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

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

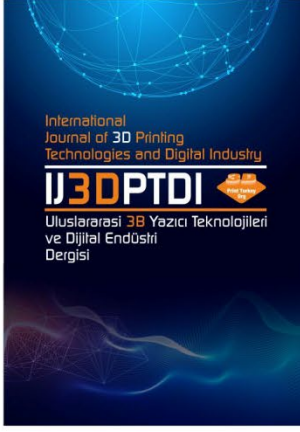
Dr. İsmail BÖĞREKÇİ, AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ, TR

ISSN 2602-3350

İçindekiler /Table of Contents	Sayfa /Pages
Araştırma Makaleleri/Research Articles	
INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SAND CASTING MOLDS PRODUCED BY BINDER JETTING 3D PRINTER	142-149
İbrahim ASLAN, Ahmet CAN	
EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OPTIMUM CUTTING TOOL FOR CNC MILLING OF 3D PRINTED PLA PARTS	150-160
Fuat KARTAL, Arslan KAPTAN	
PLANET REDÜKTÖRLÜ ROBOTİK AKTÜATÖR TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI	161-168
Ahmet Burak TATAR	
INVESTIGATION OF STRESSES ON IMPELLER BLADES BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSES	169-174
İsmail BÖĞREKÇİ, Pınar DEMİRCİOĞLU, Berkay SERT, Ahmet GÖGEBAKAN, Mujtaba ABBAKAR	
EĞİTİM VE ARAŞTIRMA AMAÇLI 3B BASKILI KARACİĞER FANTOM TASARIMI	175-183
Fahrettin Fatih KESMEZACAR, Nami YEYİN, Özge DEMİR	
INFLUENCE OF ABRASIVE WATER JET TURNING OPERATING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF ABS AND PLA 3D PRINTED PARTS MATERIALS	184-190
Fuat KARTAL, Arslan KAPTAN	
INTERNET OF THINGS BOTNET DETECTION VIA ENSEMBLE DEEP NEURAL NETWORKS	191-197
Yağız Onur KOLCU, Ahmet Haşim YURTTAKAL, Berker BAYDAN	
2D LATTICE GENERATION BY COMPUTATIONAL DESIGN METHOD	198-203
Nurullah YÜKSEL, Hüseyin Rıza BÖRKLÜ	

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) FİLAMENTLERİN NEMLİ ORTAMA MARUZ KALMALARI SONUCU MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI	204-219
Gökçen ŞAHİN, Hasan ÖZYILDIRIM, Anıl ŞAHİN	
YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA DOLGU MALZEMELERİNİN BAĞLANTI MUKAVEMETİNE ETKİSİ	220-232
Oğuz KOÇAR, Nergizhan ANAÇ, Baki HAZER	
DÖRT BACAĞI KEŞİF ROBOTUNUN PROTOTİP TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI	233-242
Alper Kadir TANYILDIZI	
ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN RÖLE ANAHTARLAMALI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARLANMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	243-251
Samet PALTACI, Samet YALCIN, Abdullah GENÇ	
INVESTIGATING PRINTABILITY AND MECHANICAL PERFORMANCE OF 3D PRINTED RECYCLED PET WITH PLA AND TPU HYBRID ADDITIVES	252-258
Kutay ÇAVA, Mustafa ASLAN	
TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ISIL PERFORMANSIN DENEYSEL İNCELENMESİ	259-267
Mustafa ASKER, İsmail BÖGREKÇİ, Pınar DEMİRCİOĞLU	
VASCULAR ARTERY SIMULATION MODEL FABRICATION FOR PRE-SURGERY KIT FOR STENT APPLICATION THROUGH 3D PRINTING	268-276
Tuğba UĞURTAŞ, Hakan YILMAZER	
MALICIOUS UAVS CLASSIFICATION USING VARIOUS CNN ARCHITECTURES FEATURES AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS	277-285
Ahmet FEYZİOĞLU, Yavuz Selim TASPINAR	

DIGITAL INDUSTRIALIZATION IN THE TRANSITION TO 3D PRINTING TECHNOLOGY	286-294
Erhan ÖZKAN	
HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND GREY WOLF OPTIMIZER FOR SETTING PID PARAMETERS OF BLDC MOTORS	295-302
İlhan KOÇASLAN, Yavuz ÜSER, Utku KÖSE	
CNC TEZGAHLARININ DİJİTAL İKİZ MODELİ İLE KOMUT TAMAMLANMA SÜRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ	303-321
Elif CESUR, Raşit CESUR, Beyza Nur AYDOĞAN	
SYSTEM IDENTIFICATION AND VIBRATION ANALYSIS OF ROTATING BEAM WITH LATTICE STRUCTURES	322-327
Serkan ÇAŞKA, Muhammed Enes DOKUZ, Mustafa AYDIN, Mehmet İLMAN, Şahin YAVUZ	
Derleme Makale/Review Article	
DIGITALIZATION IN BUSINESS MANAGEMENT	328-352
Ayla AVCI	



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>

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SAND CASTING MOLDS PRODUCED BY BINDER JETTING 3D PRINTER

Yazarlar (Authors): İbrahim Aslan *, Ahmet Can 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Aslan İ., Can A., “Investigation Of Mechanical Properties Of Sand Casting Molds Produced By Binder Jetting 3D Printer” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 142-149, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1222613

Araştırma Makale/ Research Article

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

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SAND CASTING MOLDS PRODUCED BY BINDER JETTING 3D PRINTER

İbrahim Aslan ^a ^{*}, Ahmet Can ^b 

^aNecmettin Erbakan University, Institute of Science and Technology, Mechanical Engineering Department, TURKEY

^bNecmettin Erbakan University, Faculty of Fine Arts And Architecture, Department of Industrial Design, TURKEY

* Corresponding Author: ibrahim.aslan@amasya.edu.tr

(Received: 21.12.22; Revised: 03.03.23; Accepted: 09.05.23)

ABSTRACT

The effective use of the additive manufacturing method in the casting industry plays an important role on rapid prototyping of casting samples. The production of negative-drafted and complex shaped casting parts, which cannot be produced with the classical modeling technique with sand-mold, can also be produced very easily with this method. On the other hand, it is very fast and effective, especially in terms of rapid production of prototype castings, which can be directly molded without the need for model production. In this study, a 3D Printer with binder jet technology was designed and produced. 3D Printer; It consists of 3 parts, the main chassis, the sand spreader and the spraying part. Sand mold samples were produced with different nozzle feed rates, different catalyst ratios and sand grain sizes. The consumables used in the production of sand molds are silica sand, furan resin and catalyst. The mechanical properties of the produced samples were determined by performing compression and gas permeability tests. The compressive strength was found in the range of 0,6471 MPa - 0,0472 MPa and the gas permeability was found in the range of 180 GP - 150 GP for the samples produced at different printing parameters. Afterwards, it was determined which of the produced samples were more suitable for a sand casting mold by comparing the results obtained from similar studies in the literature. In this study, a new printer was designed with direct spray technique without using cartridges and preliminary studies were carried out successfully.

Keywords: Binder Jetting, Casting, Additive Manufacturing, Sand Mold, Mechanical Properties, 3D Printer.

1. INTRODUCTION

A three-dimensional printer is a machine that produces three-dimensional solid objects from a three-dimensional CAD (Computer Aided Design) file prepared in the digital environment. These machines are similar in design to CNC (Computer Numeric Control) systems and work similar to them. Thanks to three-dimensional printers, models designed in digital environment can become objects that can be handled and examined in a short time. Three-dimensional printer technologies work with the technique of stacking layers on top of each other. But the methods of creating these layers may differ. The most widely known of these methods are those that form solid objects by melting plastic materials [1].

Process differences in 3D printer technologies are determined by the American Society for Testing and Materials (ASTM) depending on the machinery and materials used: 1- Vat Photopolymerization, 2- Material Extrusion, 3- Material Jetting, 4-Binder Jetting, 5- Powder Bed Fusion, 6- Directed Energy Deposition and 7- Sheet Lamination was made in seven main categories, including energy accumulation [2].

Today, 3D printers are used in a wide range of areas from aviation, automotive, medical and medical applications, molding applications, nano composite production, energy sector, construction industry, textile, food industry, education, art and hobby applications [3].

Ulkir et al. [4] investigated production of piezoelectric cantilever using MEMS-based layered manufacturing technology. The fabrication of the piezoelectric cantilever was made by Stereolithography (SLA), which is one of the additive manufacturing methods. This is an example of the uses of 3D printers.

There are several additive manufacturing methods used to produce casting sand molds. Some of these are Selective Laser Sintering, Stereolithography, Fused Deposition Modeling, Material Extrusion, Material Jetting, and especially Binder Jetting (3D Printing) are the most commonly used additive manufacturing methods for making casting sand molds and models [5].

The binder jetting process uses two materials; a powder based material and a binder. The binder acts as an adhesive between powder layers. The binder is usually in liquid form and the build material in powder form. A print head moves horizontally along the x and y axes of the machine and deposits alternating layers of the build material and the binding material. After each layer, the object being printed is lowered on its build platform. In Figure 1 show an example binder jetting method [6].

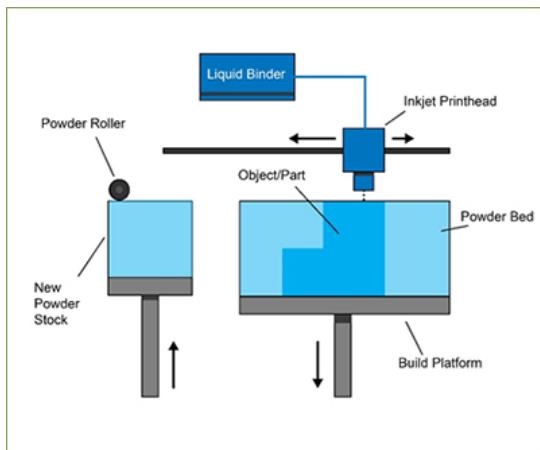


Figure 1. Binder jetting [6].

Due to the method of binding, the material characteristics are not always suitable for structural parts and despite the relative speed of printing, additional post processing can add significant time to the overall process.

As with other powder based manufacturing methods, the object being printed is self-supported within the powder bed and is

removed from the unbound powder once completed. The technology is often referred to as 3DP technology and is copyrighted under this name [6].

The Binder Jetting is capable of printing a variety of materials such as metal, ceramics and sand. Some materials, such as sand, do not require additional processing. Other materials often require additional treatments such as curing or sintering. In the additive manufacturing method, solid layers are produced, there is no need for a separate mold because the parts are supported with loose powder in production, very large sized and complex shaped parts can be produced, no permanent thermal stresses are created on the parts produced because no heat source is used during production, and it is more cost effective than other additive manufacturing methods. Cast core and sand molds can be produced by the additive manufacturing method with binder jetting [5].

Cast core and sand molds can be produced by the additive manufacturing method with binder spraying. They are given in the Figure 2.

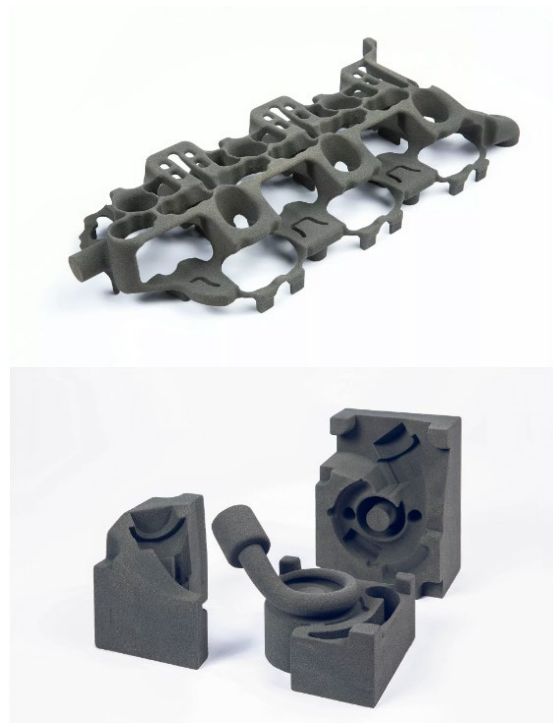


Figure 2. 3D printed sand casting cores and 3D printing molds for casting metal, respectively [7].

In this study, sand molds with different printing parameters that can be used for casting applications according to the binder jetting

additive manufacturing method were produced and the mechanical properties of the produced molds were investigated. Thanks to this study, we aim to create the infrastructure for producing sand models ready for casting directly without using wood and aluminum models.

In this study, a 3D printer with a new spray nozzle system was produced with direct injection technique without using cartridges. Thus, sample production was provided in the 3D printer, which was produced with a more economical design.

2. MATERIAL AND METHOD

Sand mold samples were printed in a binder jetting 3D Printer, which was produced by designing a special spray system. Binder jetting 3D Printer is given in Figure 3. The building area dimensions of Binder Jetting 3D Printer are 320x345x300 mm. Axis motion speeds can be adjusted with the speed of the stepper motors used. Mach3 program was used as the software in the binder jet 3D printer.

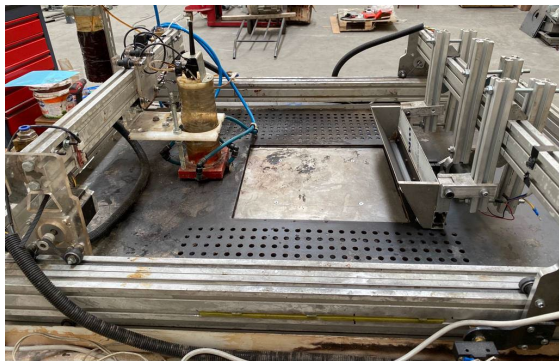


Figure 3. Binder jetting 3DP.

Afterwards, compression and gas permeability tests were carried out to determine the mechanical properties of the produced sand molds at different printing parameters. The work flow chart is given in Figure 4.

CAD-Three Dimensional Part Design
CAM and G Code Generating
Determining Printing Parameters
<ul style="list-style-type: none"> • Sand particle size, • Catalyst ratio, • Printhead feedrate
Sand + Catalyst Mixture
Sample Production
<ul style="list-style-type: none"> • Laying the sand+catalyst mixture • Spraying the resin

Mechanical Tests
<ul style="list-style-type: none"> • Compression Test • Gas Permeability Test

Figure 4. Work flow chart.

For the production of sand molds, sand and catalyst were mixed homogeneously at certain mixing ratios and filled into the vibrating sand chamber. In order to form the base layer and prevent the part from sticking to the part of the building area, the hopper was moved back and forth in the Y-axis direction to form 3 layers. Then, the spraying process was carried out by selectively moving the sprayer head on the sand layer for the CAD design, CAM and G codes of the sample to be produced. Afterwards, a sand spreading layer was laid and the sprayer part was moved again. These processes continued until the last layer was finished and the sample was produced. Afterwards, the sample was kept in the printer for a certain period of time to cure at room temperature, and then the sample was removed. Then, the mechanical properties of the 25x15 mm and 50x20 mm cylindrical samples, which were printed on a binder-jet 3D printer, were determined by performing the compression test and gas permeability test. Silica sand, furan resin and catalyst were used as consumables for the production of sand molds. Consumables are given in Table 1.

Table 1. The consumables.

Material	Specifications	Density(gr/cm3)
Foundry Sand	Silica Sand	2,65
Furan Resin	Furanol CS470	1,14-1,16
Furan	Furanol Serter	1,22-1,27
Catalyst	CS30-80	

Sand particle size, catalyst ratio and printhead feedrate were used as printing parameters in sample production. The printing parameters are given in Table 2.

Table 2. The printing parameters.

Parameters	Specifications
Sand particle size	Fine sand (125-250 μ m) Coarse sand (250-500 μ m)
Catalyst ratio (by weight of sand)	%0,5-0,6-0,7
Printhead feedrate	F300-F400-F500 mm/min

3. EXPERIMENTAL RESULTS

25x15 mm cylindrical samples were printed for each parameter in the binder jet 3D printer. Compression test was performed on the printed samples with a special apparatus (loadcell) mounted on the CNC vertical processing machine. Precise results were obtained with the load and displacement data obtained from the CNC and recorded in the Labview Program. Two samples were tested for each parameter and the average was taken. Figure 5 shows the sample in the compression test. Test results are given in Figure 6-7.

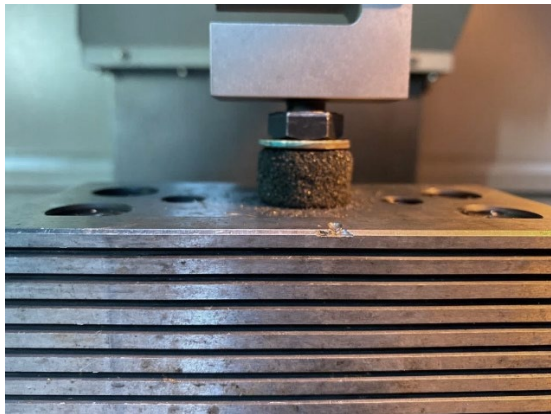


Figure 5. The sample in the compression test.

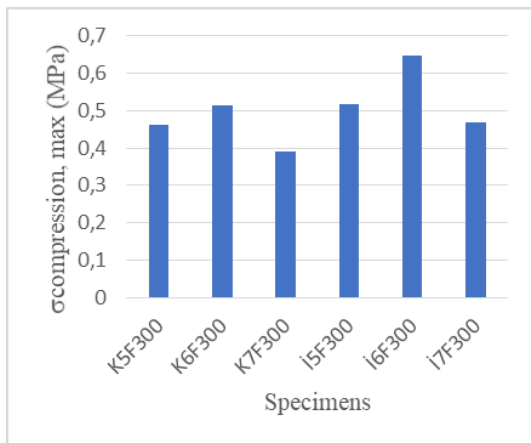


Figure 6. Coarse-fine particle sand size, different catalyst ratio and same printhead feedrate.

According to Figure 6, $F=300$ mm/min for coarse sand (250-500 μm). It is seen that the compressive strength increases as the catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate, and then it decreases. It is seen that the highest compressive strength is in the K6F300 sample with 0,6% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that

ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the compressive strength is lower than the maximum.

In addition, $F=300$ mm/min for fine sand (125-250 μm). It is seen that the compressive strength increases as the catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate, and then it decreases. It is seen that the highest compressive strength is in the I6F300 sample with 0,6% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the compressive strength is lower than the maximum.

Guo et al. [8] show that when the resin content is constant, the tensile and flexural strengths of the sand mold initially increase and then decrease with the increase in the curing agent content. When the curing agent content is constant, the tensile and bending strengths of the sand mold increase with the increase in the resin binder content. According to the analysis, the main factors affecting the strength of the sand mold are resin binder content, hardener content and sand mold density. The higher the resin binder content, the higher the strength of the sand mold. The curing agent increases the degree of crosslinking of the resin binder, thereby increasing the strength of the sand mold. Since three-dimensional printing on the sand mold requires mixing the curing agent and the sand particles, the curing agent content directly affects the fluidity of the sand particles. The higher the hardening agent content, the lower the fluidity of the sand particles and the lower the compactness of the sand layer.

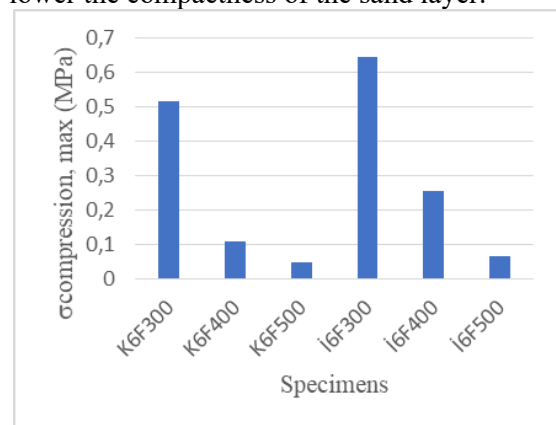


Figure 7. Coarse-fine particle sand size, same catalyst ratio and different printhead feedrate.

According to Figure 7, for coarse sand (250-500 μm) at a constant (0,6%) catalyst ratio, it is seen that the compressive strength decreases as the printhead feedrate increases. It is seen that the highest compressive strength is in the K6F300 sample, which has a feed rate of F300 mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the print head advance speed affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the compressive strength also decreases.

In addition, for fine sand (125-250 μm) at a constant (0,6%) catalyst ratio, it is seen that the compressive strength decreases as the printhead feedrate increases. It is seen that the highest compressive strength is in the I6F300 sample with a feed rate of F300 mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the print head advance speed affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the compressive strength also decreases.

Khandelwal et al. [9] on the other hand, the effects of sand grain size, binder percentage and curing time on mechanical properties as well as dimensional changes of chemically oven-free, chemically bonded molds and cores were investigated by laboratory experiments. As a result of the study, the compressive strength of the mold properties for different test parameters was found to be in the range of 4,08 kg/cm²-16,16 kg/cm² (0,400 MPa- 1,584 MPa). Optimum mold properties were obtained in 2,4% binder, 40 GFN grit and after 4 hours of curing, and optimum compressive strength of 14,80 kg/cm² (1,451 MPa) was obtained.

Motoyama et al. [10] examined the validation of thermal stress analysis, including the furan sand mold used to predict the thermal stress in castings. In addition, in the study, the compression test result graph of the sample produced using silica sand and 1,2% furan resin was given and it was seen that the maximum compressive stress was in the range of 0,8-1,0 MPa.

Said et al. [11] investigated the optimization of the mold composition to improve the quality of sand casting. They aimed to optimize the composition of silica sand, bentonite, water and

coal dust in green sand to reduce defects in foundry products. In the study, the effect of parameters on compressive strength was investigated. As a result of the study, the green compression strength of the samples was determined in the range of 30-100 kN/m² (0,03-0,1 MPa).

According to the literature research, it has been seen that many printing parameters affect the compression test results. When the compression test results obtained according to the selected compression parameters in our study were examined, it was seen that it was lower than the results of other studies in the literature. The reason for the low compression strength is thought to be due to the use of sand, resin and catalyst used in traditional casting in production with a 3D printer. However, when we look at the literature as the green compression strength of the traditional casting sand mold, it shows that the compression strength result of the samples produced in the study is sufficient for the sand mold.

50x20 mm cylindrical samples were printed for each parameter in a binder-jet 3D printer. Gas permeability test was performed on the printed samples. Gas permeability results were found for a 50x50 mm cylindrical sample using the equation below, since the test sample is 50 mm in diameter and 50 mm high, and the gas permeability measuring device gives the results according to the standards accepted by AFS (American Foundry Association) for gas permeability. Two samples were tested for each parameter and the average was taken. Calculation of gas permeability is given in Equation (1). Figure 8 shows the sample in the gas permeability test and the samples produced. The test results are given in Figure 9-10.

$$GP = V.H / A.P.t \quad (1)$$

In this place; GP: Gas permeability number, V: The volume of air passing through the test sample (cm³), H: Height of test specimen (cm), A: Cross-sectional area of the test specimen (cm²), P: air pressure (gr/cm²), t: Time for air to pass through the test sample (min).

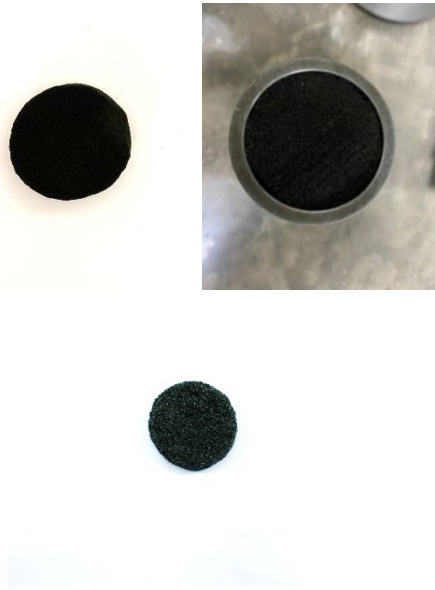


Figure 8. K7F300 gas permeability sample and the sample in the test tube, I6F400 compression test sample, respectively.

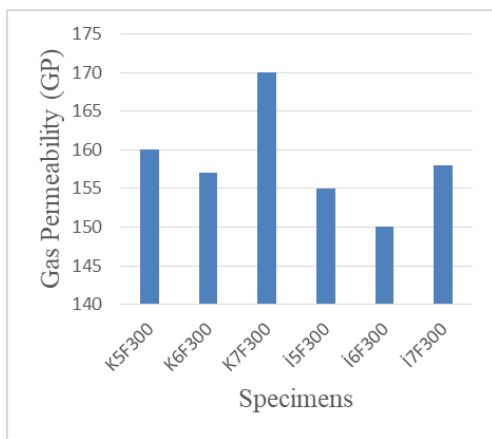


Figure 9. Coarse-fine particle sand size, different catalyst ratio and same printhead feedrate.

According to Figure 9, it is seen that the gas permeability decreases as the catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate of $F=300$ mm/min for coarse sand ($250-500 \mu\text{m}$), and then increases. It is seen that the highest gas permeability is in the K7F300 sample with 0,7% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin-catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the gas permeability is higher than the minimum.

In addition, for fine sand ($125-250 \mu\text{m}$), it is seen that gas permeability decreases as the

catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate of $F=300$ mm/min and then increases. It is seen that the highest gas permeability is in the I7F300 sample with 0,7% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin-catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the gas permeability is higher than the minimum.

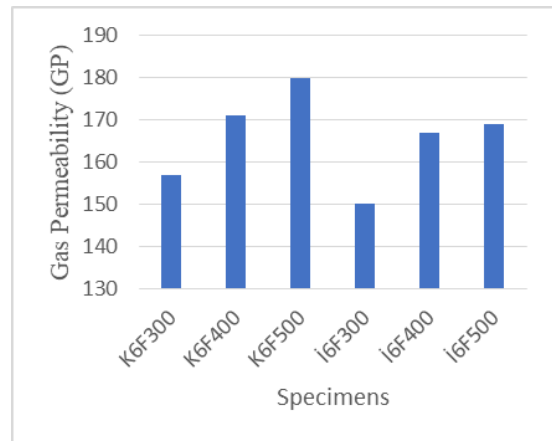


Figure 10. Coarse-fine particle sand size, same catalyst ratio and different printhead feedrate.

According to Figure 10, it is seen that the gas permeability increases as the printhead feedrate increases at a catalyst rate of 0,6% for coarse sand ($250-500 \mu\text{m}$). It is seen that the highest gas permeability is in the K6F500 sample with a feed rate of $F500$ mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the printhead feedrate affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the gas permeability also increases.

In addition, for fine sand ($125-250 \mu\text{m}$), it is seen that gas permeability increases as the printhead feedrate increases at a catalyst rate of 0,6%. It is seen that the highest gas permeability is in the I6F500 sample with a feed rate of $F500$ mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the printhead feedrate affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the gas permeability also increases.

Coniglio et al. [12] they calculated the gas permeability of the sand mold samples produced from silica sand and furan binder. In the production of the molds, average sand particle size (140 μm), activator content (0.18% of sand weight), magnesium inhibitor (0.4% weight of sand), heating temperature (305 K) were kept constant. Samples were produced with the values of sand spreader speed (between 0,130-0,286 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), sand layer thickness (280 μm), printing resolution (120-140 μm). According to the test results, the gas permeability, which is an important property of the sand mold for casting, varied within a wide range from 70 to 160 GP.

Martinez et al. [13] on the other hand, sand molds were produced by choosing round or round-cornered silica sand with a grain fineness number (GFN) of 65 and six different binder deposition settings with a binder content between 1% and 3%, and gas permeability was calculated. Permeability values at different resin ratios were found to be approximately 130-190 AFS. The permeability measurements confirm the hypothesis that increased difficulty in degassing will occur with the increase in binder concentration during casting.

According to the literature research, it was seen that many printing parameters affect the gas permeability test results. In this study, when the gas permeability test results obtained according to the selected printing parameters were examined, it was seen that they were in parallel with the results of other studies in the literature.

4. CONCLUSION

Sand mold production for complex shaped, reverse angled and especially prototype products is important for the casting industry. In recent years, the use of additive manufacturing has increased in the casting industry. In particular, the production method with a binder-jet 3D printer is one of the areas open to development for the casting industry. For this reason, this study is important for the production of sand molds in the casting industry. In this study, cylindrical samples were produced as the mechanical properties of the produced sand molds were investigated.

The study shows that for both sand grain size ranges (coarse-fine) and $F=300$ mm/min. at the printhead feedrate. It is seen that the

compressive strength increases as the catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate, and then it decreases. It is seen that the highest compressive strength is in the I6F300 sample with 0,6% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the compressive strength is lower than the maximum.

In Addition, for both sand grain size ranges (coarse-fine) and at a constant (0,6%) catalyst ratio. it is seen that the compressive strength decreases as the printhead feedrate increases. It is seen that the highest compressive strength is in the I6F300 sample, which has a feed rate of F300 mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the print head advance speed affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the compressive strength also decreases.

It is seen that the gas permeability decreases as the catalyst ratio increases up to a certain amount at the printhead feedrate of $F=300$ mm/min for both sand grain size ranges (coarse-fine), and then increases. It is seen that the highest gas permeability is in the K7F300 sample with 0,7% catalyst ratio. This is thought to be due to the appropriate resin-catalyst saturation ratio. That is, since the amount of resin in the structure is constant, the catalyst ratio that will react with the resin in that ratio is important. If the catalyst ratio is more or less than it should be, the gas permeability is higher than the minimum.

In Addition, it is seen that the gas permeability increases as the printhead feedrate increases at a catalyst rate of 0,6% for both sand grain size ranges (coarse-fine). It is seen that the highest gas permeability is in the K6F500 sample with a feed rate of F500 mm/min. It is thought that the reason for this is that the increase or decrease in the printhead feedrate affects the amount of resin. As the amount of resin decreases, the chemical bond between the sand particles decreases. Thus, the gas permeability also increases.

ACKNOWLEDGES

This study was supported by project number 211419001 by Necmettin Erbakan University Scientific Research Projects (BAP) Coordination.

Originally this work was presented in 6th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2022 (HYBRID).

REFERENCES

1. Güler B., Çetinkaya K., “Endüstriyel boyutlu çift başlı Kartezyen tipi üç boyutlu yazıcı tasarımı ve prototip üretimi”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Vol. 2, Issue 1, Pages 11-22, 2018.

2. Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology, ISO/ASTM 52900:2015(E).

3. Karagöz İ., Danış Bekdemir A., Tuna Ö., “3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Vol. 9, Issue 4, Pages 1186-1213, 2021.

4. Ulkir, O., Ertugrul, I., Akkus, N., Özer, S., “Production of piezoelectric cantilever using MEMS-based layered manufacturing technology”, Optik, Vol. 273, Pages 170472, 2023.

5. Can A., Aslan İ., “Katmanlı üretim ile elde üretilmiş kum döküm kalıplarının incelenmesi”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Vol. 6, Issue 4, Pages 1269-1282, 2018.

7. Sand casting, <https://www.voxeljet.com/3d-printing-solution/sand-casting/>, June 15, 2022.

8. Guo, Z., Shan, Z., Liu, F., Du, D., Zhao, M., “Experimental investigation on the performance and mesostructure of multi-material composite 3D-printed sand mold”, Rapid Prototyp. J., Vol. 26, Issue 2, Pages 309–318, 2019.

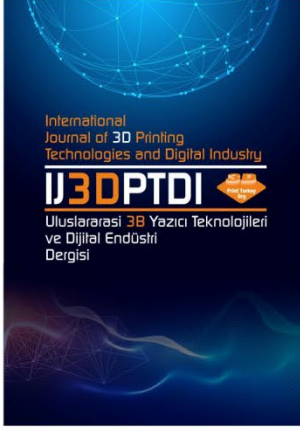
9. Khandelwal H., Ravi B., “Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties”, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 22, Pages 127–133, 2016.

10. Motoyama Y., Inoue Y., Saito G., Yoshida M., “A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Issue 12, Pages 2270-2277, 2013.

11. Said, R M., Kamal, M. R., Miswan, N. H., Ng, S., “Optimization of Moulding Composition for Quality Improvement of Sand Casting”, Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), Vol. 12, Issue 1(1), Pages 301-310, 2018.

12. Coniglio N., Sivarupan T., El Mansori M., “Investigation of process parameter effect on anisotropic properties of 3D printed sand molds”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Volume 94, Pages 2175-2185, 2018.

13. Martinez D., Bate C., Manogharan G., “Towards functionally graded sand molds for metal casting: engineering thermo-mechanical properties using 3D sand printing”, JOM, Volume 72, Issue 3, Pages 1340-1354, 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>

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OPTIMUM CUTTING TOOL FOR CNC MILLING OF 3D PRINTED PLA PARTS

Yazarlar (Authors): Fuat Kartal , Arslan Kaptan 



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kartal F., Kaptan A., “Experimental Determination Of The Optimum Cutting Tool For Cnc Milling Of 3D Printed Pla Parts” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 150-160, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1247636

Araştırma Makale/ Research Article

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

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE OPTIMUM CUTTING TOOL FOR CNC MILLING OF 3D PRINTED PLA PARTS

Fuat Kartal^a , Arslan Kaptan^b 

^aKastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, TÜRKİYE

^bSivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, TÜRKİYE

* Corresponding Author: fkartal@kastamonu.edu.tr

(Received: 04.02.23; Revised: 24.03.23; Accepted: 27.05.23)

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the most suitable cutting tool for achieving the desired diameter dimensions in parts produced using PLA material in a 3D printer. A plastic plate in the shape of a rectangular prism with dimensions of 90x40x10 mm was printed without holes with a 100% filling ratio in a 3D printer. A belt-pulley mechanism requiring bearing assembly was designed, manufactured, and tested for applicability. The study successfully identified the optimum parameters for achieving a 15 mm diameter measurement with the desired tolerance in PLA material without causing melt damage. These parameters are spindle speed of 15000 rpm, feed rate of 500 mm/min, cutting depth of 0.5 mm, minimum end mill diameter of 10 mm, and 4 cutting edges. The study also found that the morphological properties of the PLA workpiece were affected by the cutting process of different diameter milling cutters. This study investigated the optimal milling cutter for drilling holes in 3D-printed PLA parts. The method was found successful, allowing for manufacturing flexibility and reduced waste. Results provide insights for improving post-processing efficiency and sustainability in 3D printing.

Keywords: Additive manufacturing, CNC milling, Cutting tool selection, PLA machining, 3D printing.

1. INTRODUCTION

Polymer materials are preferred today, taking the place of many metallic and ceramic materials, especially because of their lightness and ease of processing [1-3]. However, the fact that polymeric materials used in the industry are produced with petroleum and its derivatives brings along various problems [2-5]. The increasing difficulty of access to petroleum resources, the increasing cost of petroleum, and the fact that petroleum-based plastics cannot degrade in nature for many years have made polymer materials produced from petroleum a global problem. For this reason, researchers are conducting studies for the discovery of biopolymers that do not cause environmental problems and are produced from non-petroleum natural resources. Biopolymers are polymeric materials produced from biological sources. Naturally sourced biopolymers do not cause waste and environmental pollution problems,

and they dissolve in nature and protect the ecological balance [1-5]. In addition, the production of biopolymers consumes less energy and has a lower carbon footprint compared to the production of petroleum-based polymers. For these reasons, the use of biopolymers in the industry is becoming increasingly common. The usage areas of biopolymers are quite wide. It is used in many sectors such as packaging materials, medical materials, agricultural materials, textile products, construction materials, and the automotive industry [6-8]. For example, biopolymers made from starch and cellulose are used as packaging materials and reduce waste problems [9-11]. In addition, biodegradable materials such as lactic acid are used in the manufacture of medicinal materials. As a result, biopolymers gain importance as an environmentally friendly and sustainable alternative, since petroleum-based polymers do

not degrade in nature and cause environmental problems. The uses of biopolymers are expanding and researchers are working to discover more biopolymers using natural resources and renewable resources [12].

Additive manufacturing, also known as 3D printing, has become increasingly popular in recent years due to its flexibility in producing complex and customized parts. ABS, PLA, and PETG filaments are the most preferred filament types, and among these, PLA filaments stand out more than others in terms of some advantages. Depending on the types of filament used to manufacture 3D printed parts, challenges such as surface quality, tensile strength [13] and dimensional accuracy must be overcome. In addition, it is aimed to obtain more durable structures by optimizing manufacturing parameters such as printing speed, fill rate, and scanning angles [14]. This is particularly important for functional parts that require additional post-processing operations such as CNC milling. PLA is one of the most commonly used materials in 3D printing due to its low cost, ease of printing, and biodegradability. However, PLA has a lower hardness and thermal stability compared to other engineering plastics, which can cause difficulties in machining processes such as milling. Therefore, the selection of an appropriate cutting tool and cutting parameters is crucial to achieving a good surface finish and dimensional accuracy of milled PLA parts [1-5].

Additive manufacturing has gained significant attention in recent years due to its ability to produce complex and customized parts [12]. The ease of use and low cost of 3D printing technology has made it an attractive option for rapid prototyping and small-scale production. However, one of the main challenges in 3D printing is achieving the desired surface finish and dimensional accuracy of the printed parts. This is particularly important for functional parts that require additional post-processing operations such as CNC milling.

PLA is a biodegradable thermoplastic polymer that is commonly used in 3D printing due to its low cost, ease of printing, and biodegradability [15]. PLA is derived from renewable resources such as cornstarch or sugarcane, which makes it an attractive option for sustainable

manufacturing [16]. However, PLA has a lower hardness and thermal stability compared to other engineering plastics [17], which can cause difficulties in machining processes such as milling. Machining PLA parts requires special considerations due to the low thermal stability of the material, which can result in melting, deformation, and poor surface finish.

To overcome these challenges, selecting an appropriate cutting tool and cutting parameters is crucial to achieving a good surface finish and dimensional accuracy of milled PLA parts. The selection of the cutting tool and cutting parameters can greatly affect the machining performance and efficiency, as well as the quality of the final product. Various types of cutting tools and cutting parameters can be used for milling PLA parts, but their effectiveness and suitability need to be evaluated experimentally.

This study aims to experimentally determine the optimum cutting tool for CNC milling of 3D-printed PLA parts. The conducted a series of experiments using various cutting tools to evaluate their effectiveness in machining PLA parts.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Materials

The main reason for using PLA material in this study is that 3D printer users around the world tend to prefer this material for printing. As seen in Table 1, it can melt at relatively low temperatures (~150 °C), making the work easier. The possibility of warping during printing is lower. Users mostly operate 3D printers in personal living spaces. Therefore, there are no special ventilation systems in these environments. PLA material is bio-based and does not harm the environment and humans [8]. On the other hand, ABS has a harmful aspect to health due to users inhaling plastic fumes during melting, so the environment must be ventilated or printing should be done in open air, which is not always possible for users.

process and G-code generation in Simplify software, c) completed experimental sample

Table 1. Some properties of PLA material [15].

Features	Symbol	Unit	Value
Polymer density	ρ	g/cm^3	1.21–1.25
Tensile strength	σ	MPa	21–60
Tensile modulus	E	GPa	0.35–3.5
Ultimate strain	ε	%	2.5–6
Glass transition temperature	T_g	$^{\circ}C$	45–60
Melting temperature	T_m	$^{\circ}C$	150–162
Rockwell hardness	HR	kg/m^2	88

2.2. Preparation of Test Samples

For the production of test samples, the Creality Ender-3-S1 printer and conventional PLA filaments, as shown in Figure 1.a, were used. The plate parts with dimensions of 90x40x10 mm were modeled in Solidworks 2015 software. The created solid models were saved in STL format and transferred to the Simplify 3D slicing program, as shown in Figure 1.b. From there, G-codes were generated for the printing process and defined as input for the printer. After entering the position of the sample on the printer tray, the fill ratio (%100), infill angle offsets ($\pm 45^{\circ}$), printer bed temperature ($60^{\circ}C$), and other production parameters, the samples were printed. The printing process of a single sample with the given dimensions took 2 hours and 5 minutes. The filament length used was 12.5 m, and the weight of the printed sample was obtained as 37 gram. The printed experimental sample is shown in Figure 1.c. To achieve consistency in the manufacturing parameters of the samples, 9 test samples were printed using the same features and printing technique.

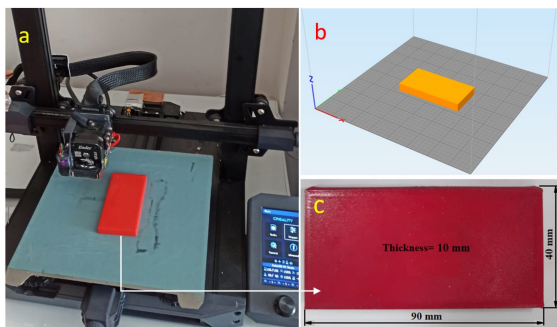


Figure 1. a) Creality Ender-3 S1, where the experimental samples were produced, b) slicing

When the necessary times for printing with and without holes (Figure 2.a and Figure 2.b, respectively) were calculated on the 3D printer, very close times of 2 hours 5 minutes and 1 hour 59 minutes were obtained, respectively. The reason for this is that the nozzle spends extra time changing its position and direction to leave the hole area empty. Therefore, it is thought that not creating holes does not cause significant time loss and it would be appropriate to achieve precise tolerances by the final process of CNC milling.

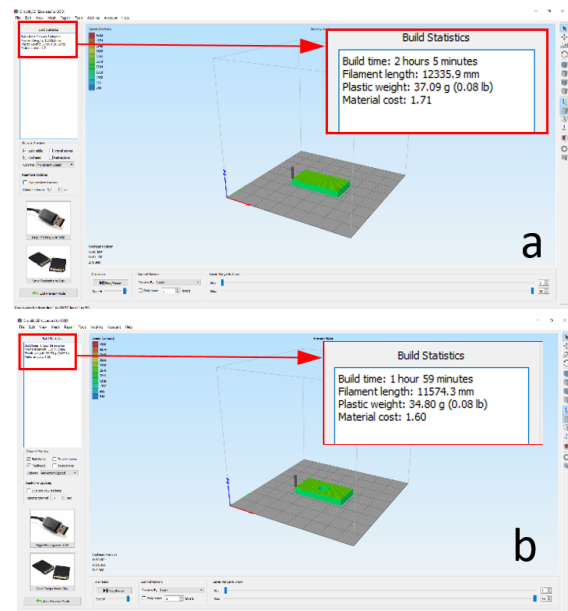


Figure 2. Manufacturing times of PLA printed parts a) without holes b) with holes.

2.3. Pocket Milling

The most preferred method for drilling holes is using a drill bit. However, delamination occurs in wood, composite [9-11], and polymer materials. As seen in Figure 3.a, a damaged formation occurs in a larger diameter than the diameter that needs to be drilled, especially where the drill bit exits. These delamination damages significantly affect the accuracy and also negatively affect the bushing and bearing seats that will be inserted into the hole, shortening the life of the part. Since a similar layering occurs in layered materials, such as the composite material shown in Figure 3.b, it does not seem appropriate to use a drill bit for PLA material.

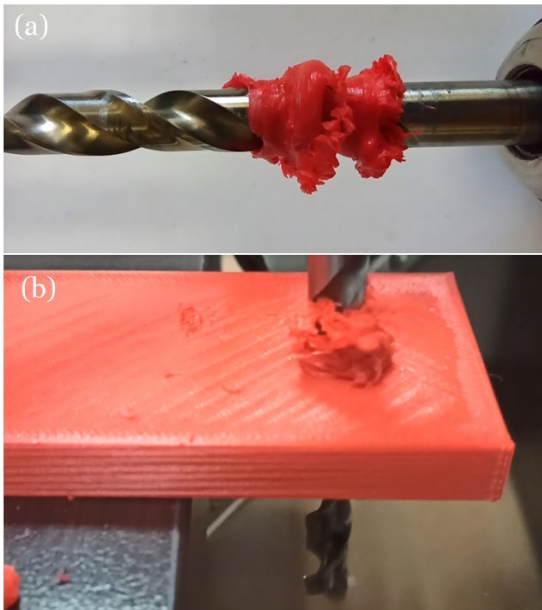


Figure 3. a) PLA melting and sticking to the drill bit. b) melting and delamination formation during drilling.

Several milling processes commonly used in industry include surface milling, profile shaping, pocket milling, and drilling. Other processing methods, except for drilling, have been studied in various literature. However, it has been identified that small-diameter (<20 mm) drilling is a topic that needs to be investigated. In assembly processes where positional tolerance is important, the drill cannot provide sufficiently accurate positioning. Therefore, the feasibility of drilling operations with CNC milling has been investigated. The special production CNC milling machine used for surface machining studies, as seen in Figure 4.a, is a 3-axis machine with a processing area of 400 mm on both the x and y axes and 200 mm on the z-axis. The maximum spindle rotation speed is 18000 rpm. It is designed for medium to high-precision manufacturing up to 0.01 mm. Coolants are generally required for processing thermoplastic materials, and petroleum-based coolants can be used for semi-crystalline plastics such as nylon, acetal, polyester, and thermosets. However, if processing any amorphous material such as PLA where it is difficult to determine its interaction with the coolant, avoiding such cooling liquids is generally a good solution [11,12,15]. Therefore, during the experiments, pressurized air was used to benefit from the cooling effect and to prevent chip buildup in front of the milling cutter. Machining of thermoplastics is an effective solution to

overcome the challenges encountered in molding and forming processes, such as high cost, time consumption, and difficulties in creating complex shapes. The process of machining can produce high-quality products with close tolerances, whether from plastics, composites, or metals. Advancements in CNC machining have led to increased accuracy and quality, achieved by increasing the number of axes or incorporating jointed-arm robots. In drilling thermoplastics, however, issues such as melting due to high temperature, product cracking, and non-optimized process parameters can arise. Researchers have developed various techniques to mitigate these problems, such as the use of hybrid machines that combine Fused Deposition Modeling (FDM) and CNC milling processes, and increasing cutting speed to drill thermoplastics. In the study, experiments were conducted to open holes with a diameter of 15 mm. In order to perform this operation, 7 different end milling cutters with properties given in Table 2 and numbered, as seen in Figure 4.b, were used. Milling cutters up to 10 mm in diameter have a two tooth cutter. This means that it has more contact with the material being cut and the heat generated during cutting is distributed to two tooth cutter. However, in four tooth cutter tools, the total heat is divided by the number of cutting edges. Thus, it is thought that more effective cooling is achieved by transmitting the heat on the contact surface to the end mill.

In addition, in order to determine the effects of using coated end milling cutters, 2 coated cutters were preferred. Thus, in order to increase the performance of the end mills and to cut faster, Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) tip number 3 and Boron Carbide (B₄C) coated insert number 7 were used. TiAlN coating is a type of coating that is widely preferred in carbide end mills that we encounter in the market. It is widely preferred in high-temperature applications. Aluminum in its composition acts as a thermal insulator due to its stability and heat resistance at extremely high temperatures. The aluminum layer on the tool surface not only provides oxidation resistance but also provides a hardness that is resistant to burrs, which are often encountered in other coatings. B₄C coating is preferred for accurate cutting geometries and precise

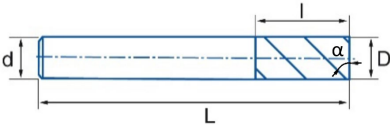
dimensional tolerances, and they are also inserts that provide good heat transfer.

During operations such as surface machining or channel cutting in CNC, the cutting tool moves on different axes on the flat surface, which does not allow the same area of the PLA part to reach high temperatures. However, in the drilling process, as the diameter decreases, the hole is vertically positioned and close to a single center, which heats both the removed debris and the surfaces of the hole that it is in continuous contact with. The rotating movement of the milling cutter in this way creates a risk of damage to the PLA material.



Figure 4. a) Desktop CNC milling machine b) end milling cutters used in processing.

Table 2. Schematic view and characteristics of cutting tools.



Cutting tool number	Tool body diameter ($\varnothing d$) [mm]	Insert diameter ($\varnothing D$) [mm]	Tool overall length (L) [mm]	Tool cutter length (l) [mm]	Helix Angle (α) [°]	Number of teeth (z)	Coating
1	10	10	100	60	45	4	Uncoated
2	8	5	130	75	30	2	Uncoated
3	10	7	75	30	45	2	Coated (TiAlN)
4	6	5	60	20	45	2	Uncoated
5	5	4	65	40	45	2	Uncoated
6	5	1.5	70	15	30	2	Uncoated
7	4	6	45	15	45	2	Coated (B4C)

3. RESULTS AND DISCUSSION

Experiments were conducted using the end milling cutters with properties given in Table 2 to observe their effects on the PLA material during processing. The drilling experiments with number 2 and number 5 end mills are shown in Figure 5.a and 5.b, respectively. Although partial drilling was observed in these experiments, the molten workpiece was deformed. In the experiment with the number 6 cutter, as seen in Figure 5.c, the drilling process did not occur at all. The intense melting observed in the workpiece due to the heat generated by the rotation of the small-diameter cutter caused the workpiece to melt before processing. Since a small diameter end mill was used here, a situation similar to the friction stir

welding of polymer materials was encountered [18]. The high temperature required for friction stir welding is a disadvantage for drilling holes. Figure 5.d shows the drilling process with cutter number 1. Accordingly, cutters 2, 4, 5, and 6 both melted the workpiece and failed to drill a hole, and their tooth cutter have broken after a while. Cutters 3 and 7 have been able to drill a hole but caused deformation and plastic accumulation at the entry and exit points of the workpiece. It is observed that a successful process that meets all expectations were realized in the workpiece processed with cutter number 1 without causing melting or deformation.

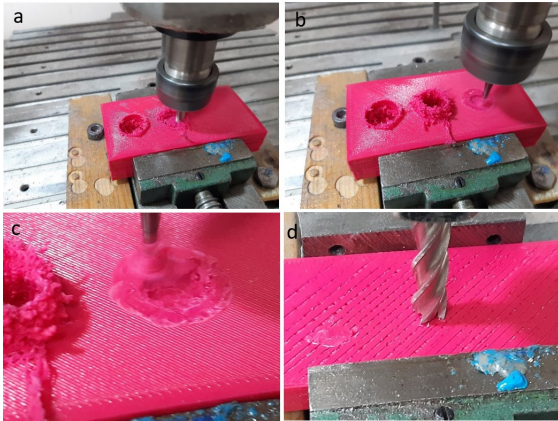


Figure 5. Machining of PLA parts with different characteristics using an end mill.

Each drilling operation was repeated three times with each end mill, using a total of 9 workpieces. In samples where multiple drilling operations were performed on the same workpiece, the workpiece was allowed to cool sufficiently after each drilling attempt. As seen in Figure 6, end mills 2, 5, and 6 were used on one workpiece (Figure 6.a), while mills 4, 3, and 7 were used on another (Figure 6.b). A separate workpiece was used with cutter 1 (Figure 6.c). The surface roughness values were measured for the hole drilled with cutter 1 because it was measurable. Surface roughness values could not be measured for the other processed surfaces because they were overly deformed. The reason why the average surface roughness of the PLA parts could not be measured is that the high values that exceeded the measurement range of the roughness testing device existed before the finishing process. However, even though the surface roughness of the PLA part could be measured, the results were quite high: $R_t = 11.7\mu\text{m}$, $R_z = 6.91\mu\text{m}$, and $R_a = 2\mu\text{m}$. Figure 6 presents a collective view of the samples subjected to the experiment. This image reflects the fact that each sample has different properties and process parameters, and therefore shows different results after processing. In the image, different diameters, shapes, and surface structures of the samples can be observed. Additionally, both perforated and non-perforated versions of the samples are included. The samples were processed using different milling tools and cutting tools. Some samples were processed using aggressive process parameters such as high speed and feed rate, while others were processed using lower speeds and feed rates. The image demonstrates the different results obtained using different process parameters and milling tools.

Figure 7 displays the scanning electron microscope (SEM) images of the melted surface of PLA plastics that occurred during processing with different cutting tools. The SEM images provide a visual representation of the particle distribution in each compound. The observed macro surface morphological variability in SEM images can be attributed to different temperature distribution patterns exhibited by various cutting tools. It is evident that the type of cutting tool used significantly affects the melting distribution behavior and general viscoelastic properties of the plastics. Since temperatures on the cutting surface reached up to $173\text{ }^\circ\text{C}$, melting and accumulation occurred, and the PLA melt adhered to the cutting tool tip. PLA melts adhering to the cutting tool tip was observed to rotate on the cutting tool for a while before cooling and glassing occurred. Furthermore, leaf-shaped formations and crystalline buds in powder form were observed in SEM images. This resulted in a more brittle structure and a sharper and more difficult-to-correct deformation pile-up. Lambiasi et al.'s [8] study showed that laser surface finishing with a 30 W CO_2 laser in continuous wave mode significantly improves the surface roughness of 3D printed PLA components. The study determined the influence of laser treatment parameters on surface morphology and identified surface ablation as the mechanism of interaction. ANOVA, RSM, and MRO were used to determine optimal process conditions, resulting in enhanced surface roughness ($R_a = 0.3\mu\text{m}$) and minimized surface recession (0.1 mm). These findings provide valuable insights for improving the surface quality of 3D-printed PLA components. The article by Lalegani Dezaki et al. [10] explores the effect of CNC machining on the surface quality of FDM products. The study investigates the surface roughness of printed and machined samples in various build orientations. The results show that the horizontal surface roughness yielded the best quality compared to perpendicular and vertical specimens. Machining was found to greatly influence thermoplastics, resulting in smoother surfaces. The research emphasizes the importance of surface quality in FDM products for better mechanical properties. Figure 7 presents a SEM image of the melted PLA pockets on the milled surfaces of the processed parts. This image provides a detailed view of the processed surface of the parts and helps determine the size and shape of the damage that

occurred after processing. The image shows the melted PLA pockets on the processed surface clearly, and their shape and size can also be observed. Furthermore, the deformation of the pockets during processing can also be seen. This image can be used as a tool to examine the details and deformations of melted PLA pockets on the processed surface of the parts. It provides valuable information for optimizing processing parameters and cutting tools, which ultimately enhances the quality of the processed parts.

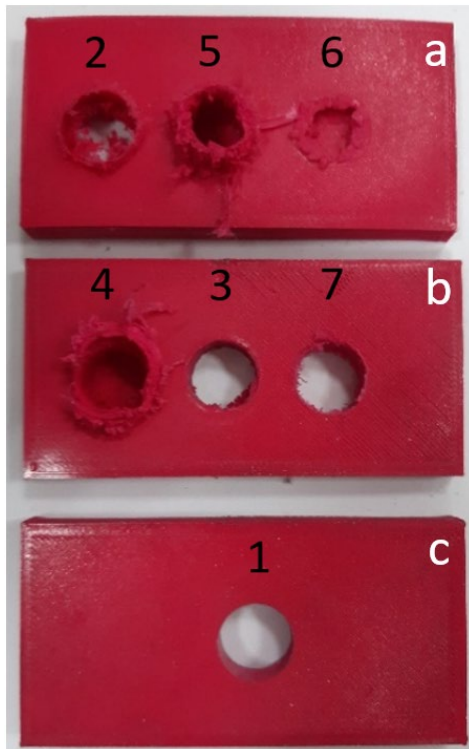


Figure 6. Overview of tested PLA plates processed with 7 different end mill cutting tool samples.

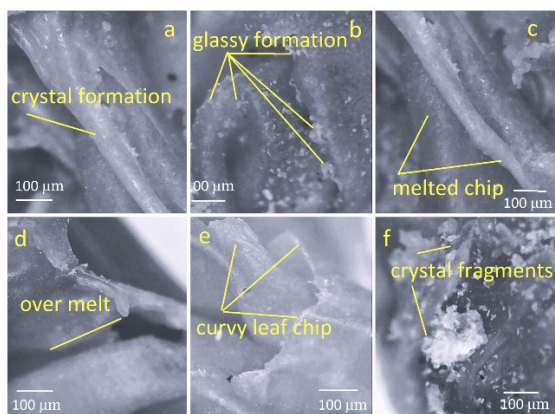
















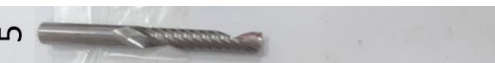













Figure 7. SEM image of melted PLA pocket milled surface of parts.

Table 3 presents the appearance of the drilled holes and the success rate of the drilling process. The table provides information on the appearance of the drilled holes in terms of their shape, diameter, and whether or not they are tapered. In addition, the success rate of the drilling process is presented as the percentage of holes that were drilled successfully without any defects or damage. The data in the table is organized based on the different processing parameters and cutting tools used in the drilling process. This information is important for evaluating the quality and accuracy of the drilled holes and for optimizing the processing parameters and cutting tools for future drilling operations. Overall, Table 3 provides a comprehensive overview of the results of the drilling process and can be used as a reference for future research and development in this area. The results led to the evaluation of CNC machining success in two separate categories as “Melting” and “Burring” as seen in Table 3. Inserts 2, 4, 5, and 6 also failed in terms of burr residue, as they did not melt the material and perform acceptable machining. This is due to the small diameter of these inserts, as well as their inadequacy in heat conduction to the cutting tool body, and it is thought that the heat exerts an effect on the PLA material's melting temperature during machining. Inserts 1, 3 and 7 were able to machine the PLA material without melting, as seen in the "Hole view" column in Table 3. On the other hand, it is seen in Table 3 that although the coated inserts 3 and 7 can process, they cause burr residues. These inserts have been successful at an acceptable level in absorbing the heat generated as a result of machining into their bodies. However, it is thought that they are insufficient in terms of burr-free machining due to the small diameter of the cutting tool and their two tooth cutter.

Table 3 shows that the number 1 cutter is more suitable for processing PLA material without melting and burr-free, since it has a sufficient body diameter and a four tooth cutter.

Table 3. Hole macro views and drilling success status of PLA parts.

End milling cutter	Hole view	Drilling success status	
		Melting	Burring
			
			
			
			
			
			
			

A practical model has been designed and manufactured based on the results obtained from experimental studies. To achieve this, a bearing with a diameter of 10 mm and 4 cutting edges, which was successfully processed with a precise end milling cutter measured at 15 mm with a caliper, was used. Drilling is also possible, but drill bits are manufactured with a 1 mm interval. For example, it is not possible to obtain holes that provide the necessary tight fit required in this model with a drill bit and that can be used with standard bearings. In machine elements, there are three types of fits defined as clearance fit, transition fit, and interference fit. The interference fit method should be preferred when the bearing needs to be pressed in. For this, if the hole is slightly larger than the nominal diameter of the shaft, it should be manufactured slightly smaller. Tolerance values have been determined for metal-to-metal fits in standards. However, there is no standard for the combination of PLA and metal. Therefore, a tolerance of 0.25 mm was preferred, and a hole with a diameter of 14.75 mm was processed on the workpiece. The standard bearing with a

diameter of 15 mm was pressed (Figure 8.a) in using the interference fit method. In Figure 8.b, a body with the pressed bearing using a hydraulic press is seen. A shaft was attached to the body with a tight fit as shown in Figure 8.c to the bearing. A weight of 1 kg was attached to the shaft at a distance of 100 mm from the bearing to test the durability of the tight fit by causing a jerky movement. A belt-pulley mechanism was placed inside the body. This mechanism, driven by a stepper motor, was tested for 200 hours of operation and no gap or looseness was observed between the bearing and the machined PLA material. Thus, it was concluded that both the drilling and fitting processes were successfully performed. Lalegani Dezaki et al. [1] investigated the effects of drilling parameters on FDM products and examined the surface texture of 3D printed samples to determine the effects of build orientation. Results showed that increasing build orientation worsened surface roughness, with horizontal specimens having the best surface quality. Moderate feed rate and spindle speed values showed the best quality in drilled

holes, and the 0° sample had the lowest Ra and Rz values. Build orientation also affected surface quality in the drilling process. Tiwary, Arunkumar, and Malik's [19] paper present a novel classification of joining and welding techniques for 3D-printed parts to create bigger-sized components. Their literature review offers insights into the various techniques, their advantages, disadvantages, and critical challenges. Their work provides a practical approach to selecting and applying suitable joining and welding techniques, enhancing the potential of 3D printing in manufacturing.

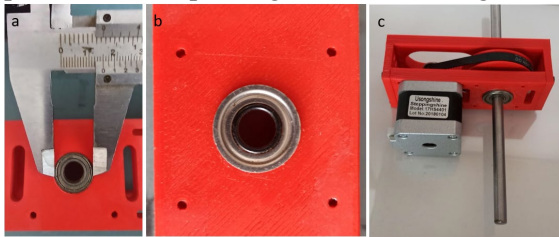


Figure 8. Sample application manufacturing a) rolling bearing on the successfully machined workpiece b) bearing sample view c.) manufacturing completed model.

According to the article by Pămărac and Petrus [20], Optimum milling parameters for face milling and profile contouring operations were determined with different cutting tool diameters for a constant spindle speed of 3500 rpm. It has been determined that slower cutting speeds provide a better surface quality for ABS material, and a better surface quality is obtained when higher cutting speeds are used for PLA material. The article by Moradi et al., [4] presents a thorough investigation of CO₂ laser cutting as a post-processing method for improving the dimensional accuracy of 3D-printed PLA parts. The study highlights the significant impact of process parameters on the quality of kerf dimensions and provides insights into optimal input parameters for achieving high-quality kerf features. The findings of this study offer valuable information for researchers and practitioners in the field of 3D printing.

This study, the article explores the optimal parameters for achieving precise diameter dimensions in PLA material parts produced using 3D printing and CNC milling processes. The study identifies the most suitable cutting tool and process parameters, highlighting the morphological changes induced by different

diameter milling cutters. The research findings can help reduce waste material accumulation, and energy-time-raw material losses, and improve the accuracy and efficiency of the manufacturing processes. Moradi et al., [4] investigates the post-processing of 3D-printed poly lactic acid (PLA) parts using CO₂ laser cutting, while Pămărac and Petrus [20] focus on determining the optimal parameters for achieving precise diameter dimensions in PLA material parts produced using 3D printing and CNC milling processes. The article examines the effects of laser-cutting process parameters on the geometrical dimension of the kerf, while this study identifies the most suitable cutting tool and process parameters for achieving the desired diameter dimensions. Overall, the two articles differ in their research objectives, methodology, and findings.

4. CONCLUSION

In this study, the optimal end milling cutter tool selection for drilling holes in 3D-printed PLA parts on a CNC milling machine was investigated. Parameters such as fixed spindle speed, feed rate, and cutting depth were taken into consideration. The results showed that completed PLA-printed parts can be used by drilling holes in them. Additionally, it was determined that PLA-printed parts can be manufactured as a base and then drilled in different positions where needed, providing manufacturing flexibility. Furthermore, it was found that the successful drilling of holes can also provide the possibility of performing similar operations such as channels and bean slots. It was concluded that in cases of faulty printed materials, other processing procedures mentioned in this study, including hole drilling, can be followed to reduce the amount of waste material. The results of this study can serve as a reference for machining studies from a broad perspective.

The optimal end milling cutter tool selection for drilling holes in CNC milling of PLA parts printed on a 3D printer with selected parameters including constant spindle speed (15000 rpm), feed rate (500 mm/min), and cutting depth (0.5 mm) was investigated. Furthermore, the functionality of the workpiece was tested on a sample model based on the findings of the study.

Some important observations from the study can be listed as follows.

- The method followed in this study was found to be successfully applicable when drilling holes in completed PLA printed parts where it is possible to use them.
- PLA printed parts can be manufactured as a base (without holes) and then holes can be drilled in different positions where they may be required, providing manufacturing flexibility.
- Achieving successful hole drilling also allows for the possibility of performing many similar operations (such as channels, bean slots, etc.). The results of this study can be a reference for processing work from a broad perspective.
- By following other machining procedures indicated in this study, such as hole drilling, waste material amounts can be reduced for poorly printed materials.

The results of this study can provide valuable insights into the selection of an appropriate cutting tool and cutting parameters for milling PLA parts. These insights can help to improve the efficiency and quality of post-processing operations for 3D printed parts, especially for functional parts that require high accuracy and surface finish. Moreover, this study can contribute to the development of sustainable manufacturing processes by providing guidance on the use of biodegradable materials in combination with efficient machining methods.

Future work

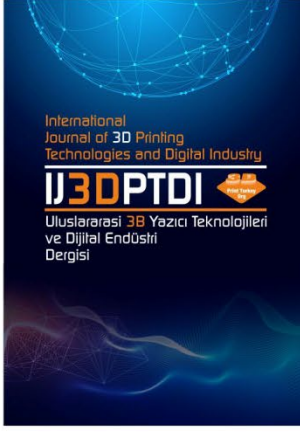
In this study, no coolant was used during the CNC milling of the PLA part. Therefore, since local heat increases are likely to occur during drilling rather than surface machining, drilling can be considered a critical process. Thus, this study revealed that drilling with a minimum 10 mm diameter milling cutter is possible. In future studies, researchers could examine the machinability of PLA material with smaller diameter milling cutters without deformation by using an additional cooling method.

Another research topic is that, for parts produced with 100% infill rate on a 3D printer, there is no weakening around the drilled hole when the method followed in this study is used. However, for parts produced with lower infill rates, the inner regions of the workpiece are grid-shaped, which inevitably leads to weakening around the drilled hole. Therefore, studies can be conducted to strengthen the planned area around the drilled hole for different infill rates.

REFERENCES

1. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M. K. A., & Baharuddin, B. T. H. T. "Experimental study of drilling 3D printed polylactic acid (PLA) in FDM process". *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, Pages 85-106, 2021.
2. Vidakis, N., Petousis, M., Mountakis, N., & Kechagias, J. D. "Material extrusion 3D printing and friction stir welding: an insight into the weldability of polylactic acid plates based on a full factorial design". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 121, Issue 5-6, Pages 3817-3839, 2022.
3. El Mehtedi, M., Buonadonna, P., Carta, M., El Mohtadi, R., Marongiu, G., Loi, G., & Aymerich, F. "Effects of milling parameters on roughness and burr formation in 3D-printed PLA components". *Procedia Computer Science*, Vol. 217, Pages 1560-1569, 2023.
4. Moradi, M., Karami Moghadam, M., Shamsborhan, M., Bodaghi, M., & Falavandi, H. "Post-processing of FDM 3D-printed polylactic acid parts by laser beam cutting". *Polymers*, Vol. 12, Issue 3, Pages 550, 2020.
5. Sandhu, K., Singh, G., Singh, S., Kumar, R., Prakash, C., Ramakrishna, S., ... & Pruncu, C. I. "Surface characteristics of machined polystyrene with 3D printed thermoplastic tool". *Materials*, Vol. 13, Issue 12, Pages 2729, 2020.
6. Sneha, N., & Balamurugan, K. "Micro-drilling optimization study using RSM on PLA-bronze composite filament printed using FDM". *IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, Pages 1-5, Mysuru, 2022.
7. Borra, N. D., & Neigapula, V. S. N. "Parametric optimization for dimensional correctness of 3D printed part using masked stereolithography: Taguchi method". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 29, Issue 1, Pages 166-184, 2023.

8. Lambiase, F., Genna, S., & Leone, C. "Laser finishing of 3D printed parts produced by material extrusion". *Optics and lasers in engineering*, Vol.124, Pages 105801, 2020.
9. Kumar, A., Alam, Z., Khan, D. A., & Jha, S. "Nanofinishing of FDM-fabricated components using ball end magnetorheological finishing process". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 34, Issue 2, Pages 232-242, 2019.
10. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M. K. A., & Ismail, M. I. S. "Effects of CNC machining on surface roughness in fused deposition modelling (FDM) products". *Materials*, Vol. 13, Issue 11, Pages 2608, 2020.
11. Mathew, A., Kishore, S. R., Tomy, A. T., Sugavaneswaran, M., Scholz, S. G., Elkaseer, A., ... & John Rajan, A. "Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts". *Progress in Additive Manufacturing*, Pages 1-18, 2023.
12. Bhattiprolu, V. S., & Crawford, G. A. "Microstructural evolution and mechanical behavior of heat treated Ti-6Al-4V powders". *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 7, Pages 761-768, 2018.
13. Kuruoğlu Y, Akgün M & Demir H. "Modelling and optimization of surface roughness and tensile strength of ABS, PLA and PETG samples produced by FDM method". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 6, Issue 3, Pages 358-369, 2022.
14. Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N, & Kaçar R. "Optimization of 3D printing operation parameters for tensile strength in PLA based sample". *Politeknik Dergisi*, Vol. 23 Issue 1, Pages 73-79, 2020.
15. Nwodu, A. L. "An experimental approach to studying first-layer adhesion in robotic printing operations" Doctoral dissertation, Florida Agricultural and Mechanical University, 2019.
16. Taib, N. A. A. B., Rahman, M. R., Huda, D., Kuok, K. K., Hamdan, S., Bakri, M. K. B., ... & Khan, A. "A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer". *Polymer Bulletin*, Pages 1-35, 2022.
17. Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. "Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials". *Materials*, Vol. 13, Issue 21, Pages 4994, 2020.
18. Karagöz, İ., & Öksüz, M. "Methods for joining thermoplastics by friction stir welding". *Journal of Çukurova University Faculty of Engineering and Architecture*, Vol. 31, Issue 1, Pages 19-28, 2016.
19. Tiwary, V. K., Arunkumar, P., & Malik, V. R. "An overview on joining/welding as post-processing technique to circumvent the build volume limitation of an FDM-3D printer". *Rapid prototyping journal*, Vol. 27, Issue 4, Pages 808-821, 2021.
20. Pămărac, R. G., & Petrus, R. E. "Study regarding the optimal milling parameters for finishing 3D printed parts from ABS and PLA materials". *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, Vol. 70, Issue 1, Pages 66-72, 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>

PLANET REDÜKTÖRLÜ ROBOTİK AKTÜATÖR TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

PLANETARY GEARED ROBOTIC ACTUATOR DESIGN AND MANUFACTURING WITH 3D PRINTER

Yazarlar (Authors): Ahmet Burak TATAR 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tatar A.B.,
“Planet Redüktörlü Robotik Aktüatör Tasarımı ve Üç Boyutlu (3B) Yazıcı ile İmalatı” *Int. J.
of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 161-168, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1244172

Araştırma Makale/ Research Article

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

PLANET REDÜKTÖRLÜ ROBOTİK AKTÜATÖR TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

Ahmet Burak TATAR ^a 

^a Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: atatar@adiyaman.edu.tr

(Received: 29.01.23; Revised: 09.03.23; Accepted: 02.05.23)

ÖZ

Bu çalışmada, eklemli robotik sistemlerde kullanılması amacıyla planet redüktör yapılı eklem tahrik ünitesi tasarlanmıştır. Aktüatör olarak ifade edilen robot eklem tahrik ünitesinin yapısında; tahrik motoru, redüksiyon sistemi, motor kontrol ünitesi ve geri bildirim ünitesi (sensör, enkoder, potansiyometre vb.) yer almaktadır. Eklem bacaklı veya manipülatör yapılı robotik sistemlerin eklem hareketleri için yüksek torklu ve hızlı tepki verebilecek tahrik sistemleri tercih edilmektedir. Kontrol ve kullanım kolaylığı açısından tahrik motoru olarak DC motor kullanılmıştır. Eklemlerde yüksek tork ve hız elde edebilmek için planet (gezegen) dişli redüktör sistemi tasarlanmıştır. 3 boyutlu (3B) yazıcılar yardımıyla PLA malzemeden imal edilecek olan planet redüktörün, kullanılacak motor, sürücü ve enkoder çeşidine göre tasarlanarak ilgili uygulamalarda kullanıma sunulması amaçlanmıştır. Hedeflenen redüktör tahvil oranına göre planet dişlilerin kinematik analizi gerçekleştirilmiş, robotik sistemlerde verimli kullanılabilmesi için uygun tasarım sonucu eklem tahrik sistemi oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Robotik, Aktüatör, Planet Dişli, Kinematik, Üç Boyutlu (3B) Yazıcı.

PLANETARY GEARED ROBOTIC ACTUATOR DESIGN AND MANUFACTURING WITH 3D PRINTER

ABSTRACT

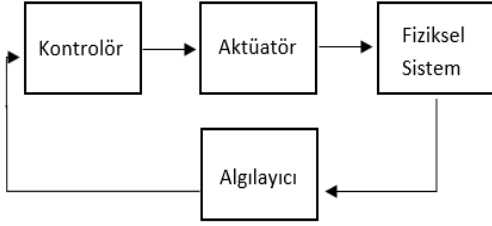
In this study, a planetary reducer joint drive unit was designed for use in articulated robotic systems. In the structure of the robot joint drive unit, which is expressed as an actuator; drive motor, reduction system, motor control unit and feedback unit (sensor, encoder, potentiometer, etc.). High torque and fast response propulsion systems are preferred for the joint movements of arthropod or manipulator structured robotic systems. In terms of control and ease of use, DC motor is used as the drive motor. A planetary gear reducer system has been designed to achieve high torque and speed at the joints. The planetary gearbox, which will be manufactured from PLA material with the help of 3D printers, is designed according to the type of motor, driver and encoder to be used, and it is aimed to be used in related applications. The kinematic analysis of the planetary gears was carried out according to the targeted gearbox ratio, and a joint drive system was created as a result of the appropriate design so that it can be used efficiently in robotic systems.

Keywords: Robotics, Actuator, Planetary Gear, Kinematics, 3D Printer.

1. GİRİŞ

Bacaklı robotların ve robot kol sistemlerinin eklem hareketlerini sağlamak için farklı tasarımlara sahip birçok aktüatör çeşidi kullanılmaktadır. Robotik sistemler; kontrolör,

aktüatör ve algılayıcı yapılarının birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 1).



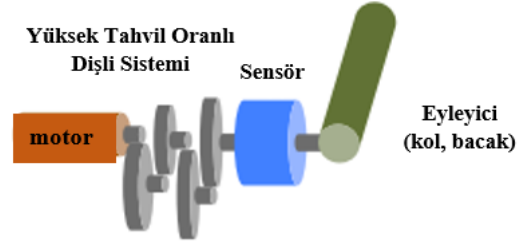
Şekil 1. Robotik sistemlerde eklem ünitesi

Robotik sistem uygulamalarında, özellikle de robot manipülatör prototip uygulamalarında robotun eksenlerini hareket ettirmek için geri beslemeli tahrik sistemleri kullanılmaktadır. Geri bildirim alabilmesinin yanında eksenlerin yüksek torka sahip olması ve hızlı ve esnek hareket kabiliyetinin olması beklenmektedir. Robot manipülatör çalışmalarında genellikle elektrik motorları kullanılmaktadır. Endüstriyel robot kol uygulamalarından ziyade, akademik ve prototip ürün bazlı çalışmalarda kullanım kolaylığından ötürü DC motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük ölçekli fiziksel parametrelere sahip olan robot sistemlerinde step motor [1] veya fırçasız DC motor (BLDC) [2] kullanılarak yapılan çalışmalar da literatürde mevcuttur. Büyük ölçekli robot kol yapılarında da tercih edilen BLDC motorlar, yapıları gereği çok yüksek hızlara sahip olduklarından genellikle bu yüksek hızı düşürüp motor torkunu artırabilmek için tahrik ünitesinde redüksiyon sistemleri kullanılmaktadır [3]. Bununla birlikte araştırmacılar geri bildirim ve yüksek tork avantajlarından dolayı çalışmalarında DC servo motorlar da kullanmışlardır [4-6].

Ar-Ge kapsamında yapılan robot kol çalışmalarına bakıldığında robot manipülatör sisteminin mekanik parçaları çoğunlukla 3B yazıcılar kullanılarak imal edilmiştir. Talaşlı imalat ürünleri kadar dayanıklı olmasa da küçük ölçekli robotik uygulamalarda 3B yazıcıdan imal edilen parçalar oldukça rijit mekanik yapılar ortaya çıkarabildiğinden dolayı akademik çalışmalarda [7] da kullanılmıştır.

Robotik bir sistemde eklem tahrik ünitesi ardışık iki robot uzvunu birbirine bağlar ve hareketini sağlar. İşlevlerini yerine getirmesi için bir eklem tahrik ünitesinin; eklem torkunu sağlayan bir aktüatör, aktüatör kuvvetini artıran bir redüksiyon sistemi ve eklem bağlantılarının hareketini bir derecede sınırlayan bir eklem yapısı içermesi gerekmektedir [8]. Bunun yanında bu yapı içerisinde yer alan sensör birimi ile de fiziksel sistemin geri bildirimi

alınarak, Şekil 2.'deki [9] gibi yüksek torklu, geri beslemeli ve redüktörlü bir aktüatör yapısı elde edilmiş olur.



Şekil 2. Robotik aktüatör yapısı [9]

Robotik aktüatörlerin tasarımındaki temel amaçlardan biri, tahrik ünitesinin torkunu yüksek tutup toplam kütlesini minimuma indirmektir. Belirli bir amaca göre tasarlanan robotik sistemlerin ihtiyaçlarına göre kullanılacak tahrik ünitesinin yapısı da durum koşullarına göre değişebilir. Bazı çalışmalarda robotik eklemlerin çok hızlı hareket kabiliyetine sahip olması hedeflenirken bazı çalışmalarda ise yüksek torka ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla bu tür farklı ihtiyaçlara göre aktüatör tasarımı da değişiklik gösterecektir. Ancak tüm mafsallı (articulated) robot yapılarında tahrik sisteminin düşük ağırlıklı olması beklenir. Yin ve ark. [10] yapmış oldukları çalışmadaki robot manipülatöründe sistemin ağırlığını minimuma indirgeyecek bir aktüatör tasarımı ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada da mafsallı robot sistemlerinde eklemlerin hareketini sağlamak için, optimum hız, yüksek tork ve minimum ağırlığa sahip bir eklem tahrik ünitesi tasarlanmış ve 3B yazıcı yardımıyla PLA malzemeden imal edilmiştir. Çalışma kapsamında, robotik eksenlerin esnek ve hızlı hareket kabiliyetine sahip olması için tahrik motoru olarak DC motor seçilmiş, eklemlerin torkunu artırmak için bir planet redüktör tasarımı ve kinematik analizi yapılmış ve bu doğrultuda sistemin imalatı gerçekleştirilmiştir. Eklemlerin hareketini kolaylaştırmayı amaçlayan bu aktüatör prototipi çalışmasında, eklemlerin hareket kısıtlamasına yol açmayacak ergonomik bir tasarım ortaya konulmuş ve imal edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

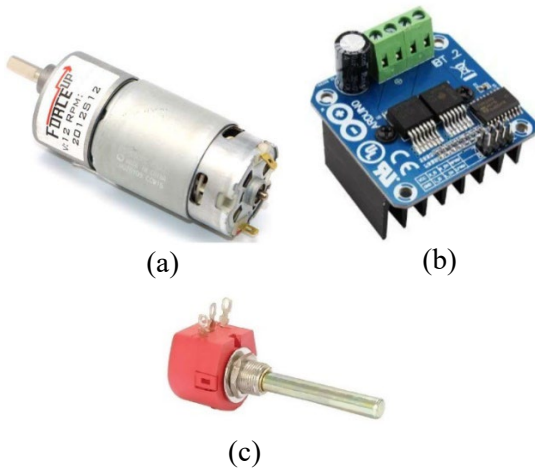
Çalışma kapsamında eklem tahrik sisteminde kullanılması planlanan uygun donanımların belirlenmesi gerekir. Dolayısıyla belirlenen amaç doğrultusunda malzeme seçimi yapılarak

mekanik ve elektronik tasarım süreci tamamlanabilir.

2.1. Malzeme Seçimi

Robotik aktüatörlerin prototip uygulama çalışmasını yapabilmek için temel donanımlar olan tahrik motorlarının, motor sürücü devrelerinin, pozisyon ve hız geri bildirim için kullanılacak sensörlerin (enkoder) belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada temel amaç yüksek tork ve minimum kütleyle sahip bir aktüatör tasarımını gerçekleştirmektir. Bunun yanında robot manipülatör, bacaklı (quadrupe) robot uygulamaları gibi mafsallı robot çalışmalarında optimum eksen (joint) hızlarının belirlenmesi gerekir. Rader ve ark. [11] yapmış oldukları çalışmada dairesel hareket yapan robot eksenlerinin maksimum hareket hızının 206 °/s olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre hareket eksenini için kullanılan aktüatörün çıkış mil hızını yaklaşık 34 rpm olarak öngörmüşlerdir. Akdağ [12] ise robot manipülatörü üzerine yapmış olduğu çalışmada eklem hızını maksimum 37,5 rpm olarak belirlemiştir.

Bu çalışmada, literatürdeki bu eklem hız değerleri göz önünde bulundurularak eklem hızı yaklaşık 50 rpm olan bir robotik eklem tahrik ünitesi oluşturulması planlanmış ve kolay kontrol edilebilirliğinden dolayı Şekil 3a'da [13] görülen ForceUp redüktörlü DC motor kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 3.a) ForceUp redüktörlü DC motor [13], **b)** BTS7960b DC motor sürücü devresi [14] **c)** Endüstriyel potansiyometre

Tahrik motorunun etiket değerlerinde motorun çıkış hızının 1000 rpm olduğu belirtilmiştir

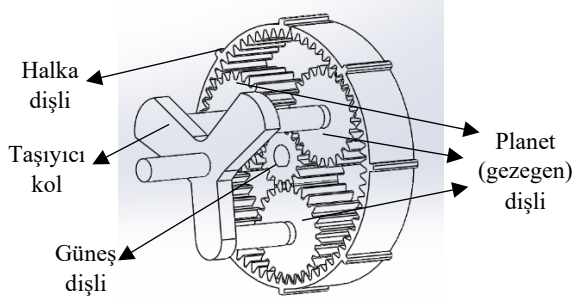
[13]. Bu çalışmada hedeflenen 50 rpm robotik aktüatör çıkış hızını elde edebilmek için yaklaşık 20:1 tahvil oranına sahip harici bir redüktör sisteminin kullanılması gerekmektedir. Tasarlanacak planet redüktörün tahvil oranının yaklaşık 20:1 olması hedefiyle redüktör hesaplamaları yapılmıştır. Aynı şekilde tahrik motorunun etiket değerine bakıldığında 1000 rpm çıkış hızındayken tork değerinin yaklaşık 21 kg.cm olduğu görülmektedir [13]. Planet redüktörün tahvil oranı da göz önünde bulundurulduğunda oluşturulacak robotik aktüatörün çıkış torku yaklaşık 420 kg.cm olacaktır ve bu değer yaklaşık 42 N.m'dir.

Seçilen tahrik motorunun sürücü devresinin de yüksek akımlara dayanıklı yapıda olması gerekir. Motor etiket değerleri dikkate alındığında çalışma akımlarının yaklaşık 2,45 A olduğu görülmektedir [13]. Oluşabilecek kayıplar ve tepe akımları göz önünde bulundurulduğunda, Şekil 3b'de [14] görülen 20 A akım kapasiteli BTS7960b DC motor sürücü devresinin aktüatörde kullanılmasına karar verilmiştir.

Aktüatör sistemindeki pozisyon ve hız geri bildirimlerinin alınması için Şekil 3c'e görülen endüstriyel potansiyometre kullanılmıştır. Robotik aktüatör tasarımı yapılırken daha hassas, daha hızlı ya da daha yüksek torka sahip bir sistem hedeflendiğinde farklı uygun donanımların seçilmesi tercih sebebidir. Bu çalışmada 50 rpm çıkış hızı için uygun donanımlar seçilmiş ve mekanik tasarım ve planet redüktör tasarımı bu hedef doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

2.2. Planet Redüktör Hesabı

Planet redüktörler kompakt tasarımı, boşluksuz yapıları ve büyük kuvvetlere dayanımı avantajlarından dolayı mobil mekanik tahrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Planet dişli sistemleri temel olarak küçük hacimde yüksek tahvil oranları elde etmeyi sağlamaktadır.

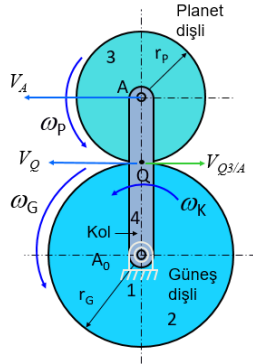


Şekil 4. Planet redüktör yapısı

Şekil 4'te görülen tek kademeli planet redüktör sistemi, güneş dişli, planet dişliler ve halka dişli yapılarından oluşmaktadır. Temel prensip, planet dişlilerin merkezlerine bağlı olan taşıyıcı kol ile tahvil oranını artırmaktır. Çoğunlukla güneş dişli merkezine tahrik motorunun mili akuple edilerek güneş dişlinin dönüşü sağlanır ve bu şekilde bağlanan dişlilerin de diğer dişliler üzerinde hareket etmesi sağlanır.

Planet dişli tasarımı yapılırken dikkate alınması gereken ilk kısıt güneş, planet ve halka dişlilerinin modüllerinin aynı olması gerekmektedir. Diğer bir kısıt ise Denklem (1)'de verilen dişlilerin diş sayıları arasındaki bağıntının sağlanması gerekir.

$$T_{H_{1,2}} = 2T_{P_{1,2}} + T_{G_{1,2}} \quad (1)$$



Şekil 5. Planet dişli sistemi kinematiği

Planet redüktör kinematiği incelendiğinde; Şekil 5'te görülen 2 serbestlik dereceli planet dişli sisteminde Q dişlilerin temas noktasıdır. Sadece yuvarlanma hareketi gerçekleştiğinden bu noktada 2 ve 3 ile gösterilen güneş ve planet dişlilerinin çizgisel hızları aynıdır.

Buna göre, güneş dişlinin Q noktasındaki hızı (2)'deki gibi olur.

$$V_{Q_2} = r_G w_G \quad (2)$$

Planet dişlinin Q noktasındaki hızı ise kola göre bağıl olarak (3)'teki gibi yazılabilir.

$$V_{Q_3} = V_A + V_{Q_3/A} = (r_G + r_P)w_K - r_P w_P \quad (3)$$

(2) ve (3)'teki çizgisel hızlar eşitlenirse (5)'teki denklem elde edilir.

$$V_{Q_3} = V_{Q_2}, \quad r_G w_G = (r_G + r_P)w_K - r_P w_P \quad (4)$$

$$\frac{w_G - w_K}{w_P - w_K} = -\frac{r_P}{r_G} \quad (5)$$

Güneş dişlinin kola göre bağıl açısal hızı, planet dişlinin kola göre bağıl açısal hızına oranlandığında planet dişli yapısındaki kolun açısal hızı (6)'daki gibi hesaplanır.

$$\frac{w_G - w_K}{w_P - w_K} = \frac{w_{GK}}{w_{PK}} = -\frac{T_P}{T_G} \quad (6)$$

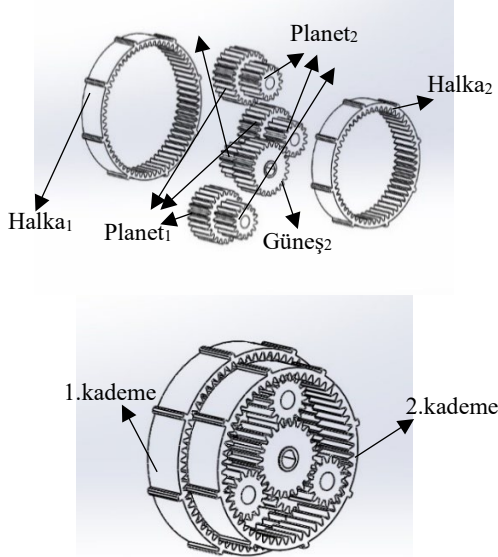
Tek kademeli planet dişlilerde kolun açısal hızı redüktörün girişi olan güneş dişlinin açısal hızına oranlandığında tahvil oranı (7)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$i = \frac{w_G}{w_K} \quad (7)$$

Ancak iki veya daha fazla kademeli planet redüktör sistemlerinde, hareket halinde olan dişlilere göre (güneş, taşıyıcı kol veya halka) tahvil oranı hesabı değişmektedir. Yukarıdaki hesaplamalarda kullanılan parametrelerde r_G : güneş dişlinin yarıçapını, r_P : planet dişlinin yarıçapını, w_G : güneş dişlinin açısal hızını, w_K : kolun açısal hızını ve w_P : planet dişlinin açısal hızını ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan planet redüktör yapısı iki kademelidir. Redüktörün ilk kademesinde güneş dişli motor miline akuple edilerek sisteme giriş hızı verilir. İlk kademede güneş ve planet dişliler hareket halindeyken halka dişli sabittir. İkinci kademede de güneş ve planet dişlilerin hareketi halka dişliyi döndürecek. İki kademeli planet redüktör yapısı Şekil 6'da görülmektedir.

Güneş₁



Şekil 6. İki kademeli planet redüktör yapısı

Planet redüktör hesabı yapılırken dişli kademe sayısı arttıkça hesaplamalar da dişli hareketlerine göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada Şekil 6'daki gibi tasarlanan planet redüktör yapısında taşıyıcı kol bulunmamaktadır. Ancak ikinci kademeye hareketin aktarımı kademeli olarak imal edilen güneş ve planet dişliler yoluyla sağlanmaktadır. Hesaplamalar yapılırken ise kol açısal hızının var olduğu kabul edilir ve (8)'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{w_{G_1} - w_K}{w_{H_1} - w_K} = - \frac{T_{H_1}}{T_{G_1}} \quad (8)$$

Çalışmadaki planet redüktör yapısındaki ilk kademede halka dişli hareket etmediği için $w_{H_1} = 0$ olarak kabul edilir. Daha sonra ikinci kademede halka dişlinin açısal hızı da w_{H_2} (9)'daki gibi hesaplanır.

$$\frac{w_{H_2} - w_K}{w_{G_1} - w_K} = - \frac{T_{G_1} T_{P_2}}{T_{H_2} T_1} \quad (9)$$

İki kademeli planet redüktörün toplam tahvil oranı da denklem (10)'daki gibi hesaplanır.

$$i = \frac{w_{G_1}}{w_{H_2}} \quad (10)$$

Tasarımı gerçekleştirilen iki kademeli planet redüktör sisteminin parametreleri, hesaplamaların yapıldığı sınırlar çerçevesinde istenilen toplam tahvil oranına göre belirlenmiştir.

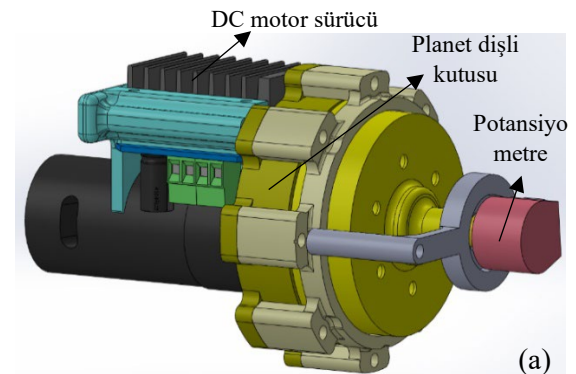
Çizelge 1. Planet dişli sisteminin fiziksel parametreleri

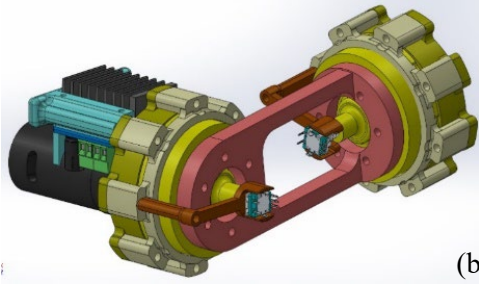
Parametre	Değer
İlk kademe güneş dişlinin diş sayısı (T_{G_1})	15
İlk kademe planet dişlinin diş sayısı (T_{P_1})	24
İlk kademe halka dişlinin diş sayısı (T_{H_1}) (Denklem (1)'e göre hesaplanır)	63
İkinci kademe güneş dişlinin diş sayısı (T_{G_2})	24
İkinci kademe planet dişlinin diş sayısı (T_{P_2})	15
İkinci kademe halka dişlinin diş sayısı (T_{H_2}) (Denklem (1)'e göre hesaplanır)	54
İlk kademe güneş dişlinin açısal hızı (w_{G_1}) (Rastgele bir giriş hızı verilebilir)	100
İlk kademe halka dişlinin açısal hızı (w_{H_1})	0

Çizelge 1'deki parametre değerleri (8)-(10) denklemlerinde kullanıldığında tasarlanan planet redüktör sisteminin toplam tahvil oranı 19,2:1 olarak hesaplanmış ve istenilen 20:1 tahvil oranı yaklaşık olarak yakalanmıştır. Hesaplanan bu tahvil oranına göre, kullanılan redüktörlü DC motorun etiket değerleri dikkate alındığında aktüatörün çıkış hızı 52,08 rpm, çıkış torku da 403,2 kg.cm = 40,32 N.m olarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu çıkış değerleri, bu tahrik sisteminin kullanılacağı robotik sistemlerin hızlı, esnek ve kararlı bir hareket için yeterli hız ve tork değerleri üretebileceğini göstermektedir.

2.3. Planet Redüktör Mekanik Tasarımı

İki kademeli planet redüktör sistemi SolidWorks programında tasarlanmıştır. Tüm donanımların yer aldığı robotik aktüatör yapısı Şekil 7a'da verilmiştir.





Şekil 7.a) İki kademeli planet redüktörün tasarım görseli b) Ardışık robotik aktüatör yapısı

Tasarlanan aktüatör yapısı, robotik sistemlerde ardışık iki tahrik ekseninin birbiri üzerinde rahatça hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ardışık eksenlerin hareketini ifade edebilmek için Şekil 7b'deki ardışık robotik aktüatör yapısı görünmektedir.

Şekil 7b'de görüldüğü gibi aktüatör sisteminin geri bildirim için enkoder de kullanılabilecektir.

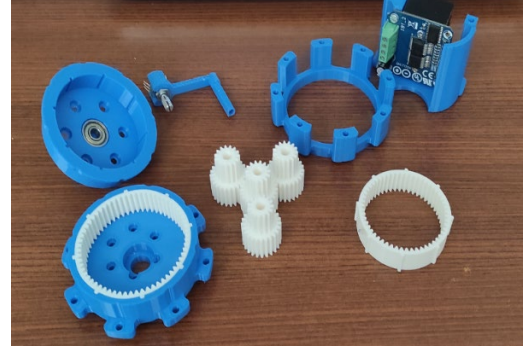
2.4. Planet Redüktör Mekanik İmalatı ve Montajı

Redüktörün imalatı Şekil 8'de görünen Creality CR 6 SE model 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir.

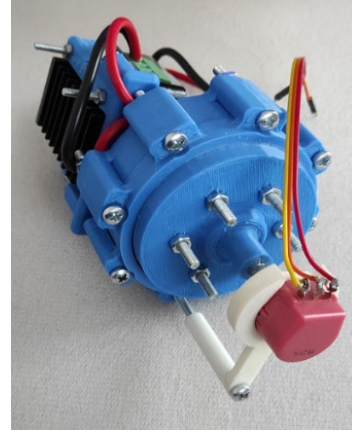


Şekil 8. Creality CR 6 SE 3B yazıcı

PLA malzemeden üretilen aktüatörün dişli yapıları aşırı yüke dayanım sağlaması için %100 doluluk oranıyla, diğer mekanik parçalar ise %90 doluluk oranıyla imal edilmiştir. Şekil 9a'da imal edilen mekanik parçalar görülmektedir.



(a)



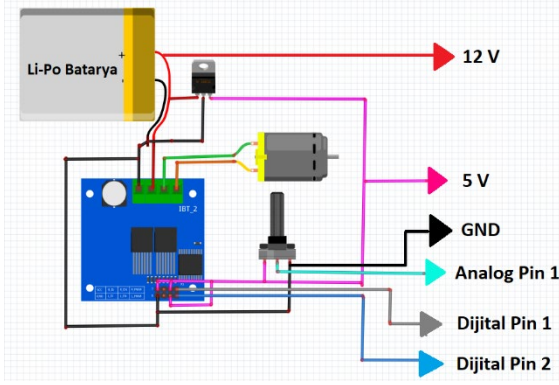
(b)

Şekil 9.a) Aktüatör mekanik parçaları b) Montajı tamamlanmış robotik aktüatör

Üretilen tüm mekanik parçaların SolidWorks ortamında yapılan tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen montajının ardından aktüatörün kullanıma hazır hali Şekil 9b'de gösterilmiştir. Aktüatörün tüm donanımlarla birlikte ağırlığı 680 gr olup uçtan uca uzunluğu 190 mm ve çapı ise 95 mm olarak ölçülmüştür.

2.5. Elektronik Devre Şeması

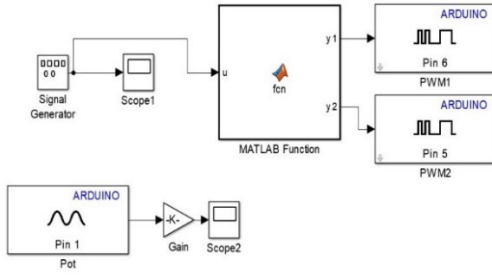
Aktüatör yapısında kullanılan elektronik donanımların bağlantısı Şekil 10'da gösterilmektedir. Elektronik devre sisteminde yüksek akım sağlama avantajından dolayı Li-Po batarya kullanıldığı öngörülerek sistem donanımlarının bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Kullanıcının tercih ettiği mikroişlemcilerin (Arduino, Raspberry Pi vs.) uygun olan analog ve dijital bacaklarına yapılacak bağlantılar da Şekil 10'da verilmiştir. Bununla birlikte DC motor sürücü devresi yüksek akım sağlayabilecek 12 V gerilime ihtiyaç duyarken, mikroişlemci ve potansiyometreler 5 V DC gerilim ile çalıştığından devre içerisinde L7805 gerilim regülatörü kullanılmıştır.



Şekil 10. Aktüatör elektronik devre şeması

3. BULGULAR

Aktüatörün mekanik ve elektronik bağlantılarının tamamlanmasının ardından MATLAB/Simulink ortamında Şekil 10'daki gibi basit bir devre tasarımı ile bir uygulama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Simulink ortamında devre tasarımı uygulaması

Tasarlanan devrenin temel amacı imalatı yapılan aktüatörlerin hesaplanan çıkış hızını sağlayıp sağlamadığını test etmek ve ispatlamaktır. Devrede DC motora çift yönlü sinyal girişi uygulanarak etiket değerinde belirtilen [13] 12 V DC gerilim altında iki yönlü motor dönüşü gerçekleştirilmiştir. Aktüatörün hareketi boyunca potansiyometrede oluşan sayısal veriler açısal konum verilerine dönüştürülmüş ve hareket süresince motorun açısal konumunun değişimi Şekil 12'deki gibi grafiksel olarak elde edilmiştir.

Bu deneysel uygulamanın temel amacı teorik olarak hesaplanan çıkış hızının üretilen prototip aktüatörde sağlanmasını gerçekleştirmektir. DC motor 12 V gerilim altında çalıştırılarak Şekil 12'deki çift yönlü sinyal girişi uygulanmıştır.

Grafiğe bakıldığında aktüatör hareketine başlarken 150° açısal konumdan 75° 'ye 0,27 s de, aynı şekilde 75° açısal konumdan 225° 'ye 0,54 s de ulaşmıştır. Süpürdüğü açıya dikkat edildiğinde aktüatörün çıkışında $277,7^\circ/s$ 'lik açısal hız elde edilmiştir. Bu da yaklaşık olarak 46,3 rpm aktüatör çıkış hızı olarak hesaplanmıştır.

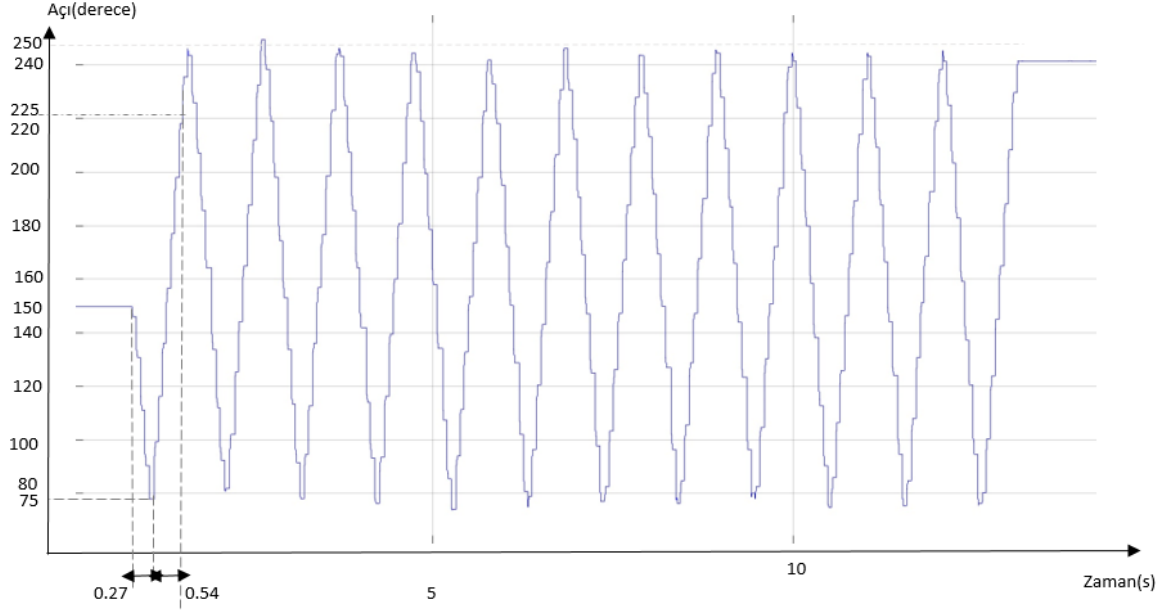
4. SONUÇLAR

Çalışmada, döner eklem yapılı robotik sistemlerin eksen hareketlerini rahatlıkla gerçekleştirebilmesi için bir eklem tahrik ünitesi tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir.

Tasarım yapılırken mevcut donanımların uygun bir şekilde birbirine akuple edilebilmesi ve çalışma entegrasyonunun sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca aktüatör yapısının elektronik bağlantılarını ifade edebilmek için elektronik devre şeması oluşturulmuştur.

Minimum ağırlık maksimum tork elde etmek amacıyla tasarlanan aktüatörün yapısında; planet redüktör sistemi, tahrik motoru, motor sürücü devresi ve geri bildirim ünitesi olarak potansiyometre kullanılmıştır. 3B yazıcı kullanılarak PLA malzemeden imal edilmesi planlanan planet redüktör sistemi ile tahrik ünitesinin (aktüatörün) çıkışında 20:1 tahvil oranı elde edilmesi hedeflenmiş ve aktüatör çıkış hızının yaklaşık 50 rpm olması amaçlanmıştır. Hedeflenen tahvil oranını elde etmek için planet redüktör sisteminin kinematik analizi ve hesaplamaları yapılmış ve 19,2:1 tahvil oranı elde edilmiştir.

Tasarım ve montajı tamamlanan aktüatörün, iki yönlü DC motor hareketi uygulaması sonucunda elde edilen açısal konum grafiğiyle aktüatör çıkış hızı 46,3 rpm olarak ölçülmüştür. Böylelikle hedeflenen 50 rpm aktüatör çıkış hızı hedefi yaklaşık olarak elde edilerek başarılı bir çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışma ile ihtiyaç olan tork ve hız parametrelerine göre uygun aktüatör tasarımının yapılabilmesinin yöntemi uygulama çalışmaları ile aktarılmıştır.



Şekil 12. Aktüatör açısız konum grafiği

TEŞEKKÜR

Finansman: Bu araştırma için herhangi bir finansman kaynağı bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması: Ahmet Burak TATAR herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

1. Koç, S., Doğan, C., “Manufacturing and controlling 5-axis ball screw driven industrial robot moving through G codes”, Gümüşhane University Journal of Science and Technology, Cilt 12, Sayı 2, Sayfa 454-465, 2022.

2. Ghorbanpour, A., Richter, H., “Energy-optimal, direct-phase control of brushless motors for robotic drives”, Proceedings of the ASME 2020, Dynamic Systems and Control Conference, Sayfa 1-10, 2020.

3. Procter, S., Secco, E.L., “Design of a biomimetic BLDC driven robotic arm for teleoperation & biomedical applications”, Journal of Human, Earth, and Future, Cilt 2, Sayı 4, Sayfa 345-354, 2021.

4. Ersin, Ç., Yaz, M., Gökçe, H., “Upper limb robot arm system design and kinematic analysis”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, Cilt 7, Sayı 3, Sayfa 1320-1331, 2020.

5. Zawkan, M., Karim, A., Thamrin, N.M., “Servo motor controller using PID and graphical user interface on Raspberry Pi for robotic arm”,

International Conference on Robotic Automation System 2021, Cilt 2319, Sayfa 1-10, 2021.

6. Tokel, Ç., “Design and implementation of a 4-axis RC servo driven robot manipulator”, Master Thesis, Dokuz Eylül University, Institute of Science and Technology, İzmir, 2009.

7. Çelebi, A., Korkmaz, A., Yılmaz, T., Tosun, H., “Design and production of 6 axis robot arm by 3D printer”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 3, Sayı 3, Sayfa 269-278, 2019.

8. Brassitos, E., Jalili, N., “Design and development of a compact high-torque robotic actuator for space mechanisms”, Journal of Mechanisms and Robotics, Cilt 9, Sayı 061002, Sayfa 1-11, 2017.

9. Wensing, P.M., Wang, A., Seok, S., Otten, D., Lang, J., Kim, S., “Proprioceptive actuator design in the MIT Cheetah: Impact mitigation and high-bandwidth physical interaction for dynamic legged robots”, IEEE Transactions on Robotics, Cilt 33, Sayı 3, Sayfa 509-522, 2017.

10. Yin, H., Huang, S., He, M., Li, J., “A unified design for lightweight robotic arms based on unified description of structure and drive trains”, International Journal of Advanced Robotic Systems, Cilt 14, Sayı 4, Sayfa 1-14, 2017.

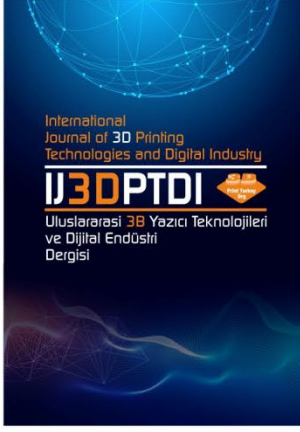
11.Rader, S., Kaul, L., Weiner, P., Asfour, T., “Highly integrated sensor-actuator-controller units for modular robot design”, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Sayfa 1-7, 2017.

12.Akdağ, M., “Design and analysis of robot manipulators by integrated CAE procedures”, Doctoral Thesis, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, Sayfa 68, 2008.

13.ForceUp Redüktörlü DC Motor, 2022, <https://www.robotzade.com/Proton-12V-1000-RPM-Reduktorlu-DC-Motor,PR-1599.html>

14.BTS7960b DC Motor Sürücü Devresi, 2022, <https://www.robotistan.com/bts7960b-20-amper-motor-surucu-karti>

15.Matejic, M.S., Blagojevic, M.Z., Matejic, M.M., “Dynamic behavior of a planetary reducer with double planet gears”, Mechanical Sciences, Cilt 12, Sayfa 997-1003, 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>

INVESTIGATION OF STRESSES ON IMPELLER BLADES BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSES

Yazarlar (Authors): Ismail BOGREKCI , Pinar DEMIRCIOGLU , Berkay SERT ,
Ahmet GÖGEBAKAN , Muğtaba ABBAKAR 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bögrekci I, Demircioglu P., Sert B., Gögebakan A., Abbakar M., "Investigation of Stresses on Impeller Blades By Computational Fluid Dynamics (CFD) Analyses" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 169-174, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1246831

Araştırma Makale/ Research Article

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

INVESTIGATION OF STRESSES ON IMPELLER BLADES BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) ANALYSES

Ismail BOGREKCI ^a^{*}, Pinar DEMIRCIOGLU ^{a,b}, Berkay SERT ^c, Ahmet GOGEBAKAN ^c, Mujtaba ABBAKAR ^c

^{a*} Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Aydın, TURKEY

^b TUM School of Engineering and Design, Institute of Materials Science, Technical University of Munich, Garching, GERMANY

^c HAUS Centrifuge Technologies R&D Center, Aydın, TURKEY

** Corresponding Author: ibogrekci@adu.edu.tr*

(Received: 02.02.23; Revised: 22.03.23; Accepted: 31.05.23)

ABSTRACT

This research explores how temperature, pressure, and blade thickness influence stresses on impeller blades. During operation, the impeller is subjected to a variety of temperature, fluid, and mechanical stresses. If the tensions are too great, these may cause deformation of the impeller blades. HAUS Centrifuge Technologies supplied the impeller used in this case study, which was destroyed in the field during the 33000rpm operation. Six blade thickness offsets ranging from 0.05mm to 0.15mm were structurally examined, and the Von-Mises stresses were compared to the impeller material yield strength. Then, the impeller with the lowest stress (197.43MPa) was chosen for the Fluid-Solid Interaction (FSI) analysis. It was then manufactured, and a performance test utilizing ISO 5389 was conducted in a test facility. According to the Computational Fluid Dynamics (CFD) data, the polytropic efficiency of the thicker impeller rose to 86.57%, whereas the polytropic efficiency of the original impeller was 75.8%. With the thicker impeller, the volume flow rate reduced from 4211.3m³/h to 3658.3m³/h. Based on the data collected, it was determined that increasing the thickness of the blade minimizes the forces operating on the blade.

Keywords: Blade thickness, CFD, FSI, Impeller, Von-Mises stress, Polytropic efficiency.

1. INTRODUCTION

The turbo compressor shown in Figure 1 is composed of an inlet cover, an impeller, diffusers, and a volute. The inlet cover draws air in, which then flows past the impeller. In pressurizing air, the impeller is subjected to a variety of stresses. These stresses are caused by heat, fluid, and centrifugal forces. As seen in Figure 2, these stresses can distort or even fracture the impeller blades if they are excessive.

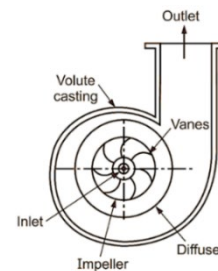


Figure 1. Compressor schematic.

The cost of manufacturing an impeller is extremely high, and a damaged impeller cannot be repaired. Therefore, the impeller's design parameters must be calculated and selected prior to production.

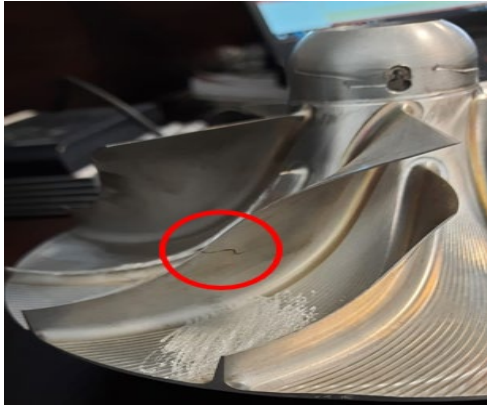


Figure 2. Fracture on impeller blade (HAUS Turbo blower impeller).

Computer Assisted Engineering (CAE) software's are used to study and optimize impellers to avoid the danger of producing impellers that are not optimal. By doing structural and fluid analyses on the impeller, excessive stress locations can be discovered, and the production of suboptimal impellers avoided.

Using an FSI analysis, it is possible to see the Coriolis forces and centrifugal forces generated by the impeller. An FSI analysis is a Multiphysics interaction between fluid flow and a solid structure. There are two ways to do an FSI analysis: one-way coupling and two-way coupling. Benra et al. [1] compared the one-way coupling method and the two-way coupling method. In a one-way analysis, the CFD analysis is conducted first, and the findings are then imported into the structural analysis module. In a two-way analysis, structural analysis is performed first, and the results are passed to a CFD module. The study by Gu et al. demonstrates the effect of FSI on rotational forces. The study indicated that fluid pressures significantly affect Von-Mises stress [2].

As previously stated, there are two approaches to conduct an FSI simulation. In a one-way coupling analysis, the pressure forces influence the impeller structural strength, life span and stability as established by Lee et al. [3]. Gong et al. [4] explain that in a two-way coupling analysis, the structural deformation of the impeller blades can influence the aerodynamic stresses within the impeller blades. By utilizing FSI analysis we can predict where the maximum and minimum stresses occur in the impeller and avoid the production of unoptimized impellers.

2. MATERIAL AND METHOD

This study aims to determine whether Von-Mises stresses are affected by blade thickness. This study's impeller was constructed from an aluminum alloy (AL T6 7075) with a yield strength of around 490 MPa. In this study, six distinct impeller models with differing blade thicknesses were evaluated, as indicated in Table 2. The weight of the impellers was also considered, as it affects the balance of the magnetic bearings. Six models were analyzed structurally to determine which impeller had the lowest Von-Mises stress. For comparative purposes, the original impeller and the impeller with the lowest Von-Mises stress were used for the FSI study.

Table 1 shows the mesh statistics and type used in the structural analysis study.

Table 1. Mesh data

	Original	Thickened	Type	Element size	
				Blades	Body
Nodes	45130	45988	Tetra	0.4	
	53	44	hedral	mm	5 mm
Elements	26151	26729	Tetra	0.4	
	08	61	hedral	mm	5 mm

Table 2. Impeller Blade Thickness.

Impeller blade thickness (t)		
Blade offset (mm)	Weight gain (g)	Total weight (g)
Original	-	2135.5
0.05	12.863	2148.4
0.075	20.78	2156.3
0.1	26.75	2162.3
0.125	34.82	2170.4
0.15	42.06	2177.6

The impeller provided by HAUS can operate at a maximum rotational velocity of 33000 rpm with a pressure rise of 1 bar and ambient temperature of 40 °C. These same conditions were used for the FSI analysis. In the CFD setup, a shear-stress transport (SST) turbulence model with an automatic wall function as well as heat transfer model of total energy was used as our domain boundary conditions. The analysis also had a residual target of 10^{-6} . The same boundary conditions were used for the structural analysis of the impeller (Figure 3).

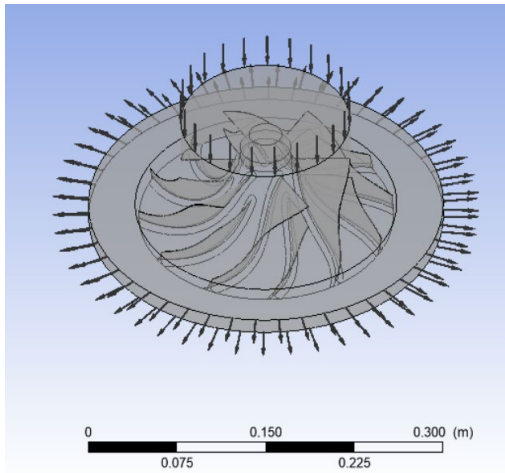


Figure 3. Impeller Fluid Domain.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Static Structural Analysis Results

From the initial static structural analysis results, it was observed that the impellers Von-Mises stresses did not exceed the yield stress of the material. Figure 4 shows that the 0.1 mm offset has the lowest stress of 186.64MPa acting on it.

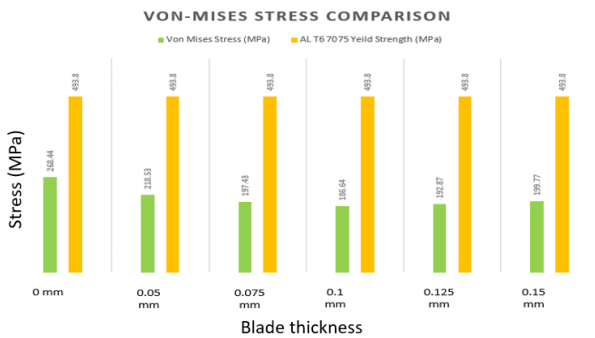


Figure 4. Von-Mises Stress Comparison of Original and Thickened Impeller.

3.2. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis Results

CFD results of original and thickened impeller are presented in Table 3.

Table 2. CFD Results of Original and Thickened Impeller.

Impeller CFD Performance Results		
	Original impeller	0.1 mm offset impeller
Rotational Speed (ω)	33000 rpm	33000 rpm
Mass Flow Rate (\dot{m})	1.53 kg/s	1.53 kg/s
Volume Flow Rate (Q)	4.35 m ³ /s	4.32 m ³ /s
Inlet Pressure (P1)	1.01 bar	1.01 bar

Discharge Pressure (P2)	2.10 bar	2.06 bar
Pressure Ratio (P2/P1)	2.08	2.04
Inlet Temperature (T1)	40.9 °C	40.2 °C
Discharge Temperature (T2)	126.9 °C	123.7 °C
Temperature Ratio (T2/T1)	3.10	3.08
Polytropic Exponent (n)	1.83	1.73
Polytropic Efficiency (η_p)	63.05%	67.54%

According to the CFD data, the polytropic efficiency (η_p) of the thicker impeller increased by 4.49% compared to the original impeller. By using the polytropic exponent n, the polytropic efficiency can be calculated. The value of the polytropic exponent n varies with the pressure ratio and temperature ratio. The formulas for these calculations were derived from ISO 5389 standards.

$$\eta_p = \frac{n(k-1)}{k(n-1)} \tag{1}$$

Where k is the isentropic exponent. The value of the isentropic exponent for ideal gases is approximately 1.4 according to the ISO 5389 standards [5].

$$n = \frac{\ln(\frac{P_2}{P_1})}{\ln(\frac{P_2}{P_1}) - \ln(\frac{T_2}{T_1})} \tag{2}$$

The polytropic efficiency derived from CFD studies is only applicable to the impeller and not the entire compressor stage. The thicker impeller has a lower temperature ratio than the original impeller. The reduction in discharge temperature increased the polytropic efficiency. [6, 7] Xinqian Zheng et al have demonstrated that high temperatures result in large loads on the impeller. However, it is important to note that results collected from Table 2 are only within the impeller fluid domain and not the whole compression operation.

The volume flow rate was also another important factor to note. Since the impeller blades have been thickened, it was predicted that the volume flow rate would decrease. The

CFD study results indicate a small decrease in volume flow from 4.35 m³/s to 4.32 m³/s. This is due to the fact that the volume flow rate is affected by the passage area between the impeller blades. By increasing the thickness of the blades, the total passage area between the blades decreases, hence reduce the volume flow rate.

The HAUS turbo blower was utilized to test the impeller's performance. Figure 5 is a schematic representation of the test bench. The turbo blower and discharge pipes were configured in accordance with ISO 5167 [8] specifications.

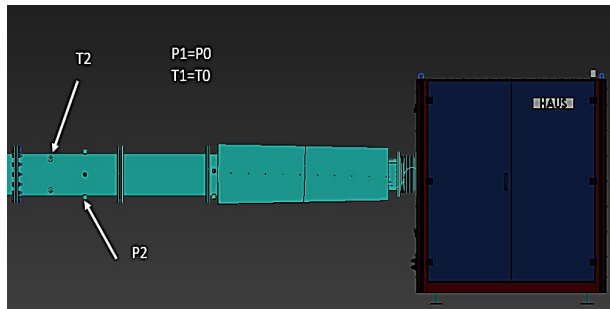


Figure 5. HAUS Turbo Blower Test Bench.

During the performance test of the impellers, a small increase in polytropic efficiency was noticed during the compression stage shown in Table 3. This slight increase is not as high as that to the CFD results. Reasons for this could be due to heat loss, friction, and ambient conditions. The volume flow rate has decreased from 1.33 m³/s to 1.26 m³/s. This is consistent with the CFD predictions.

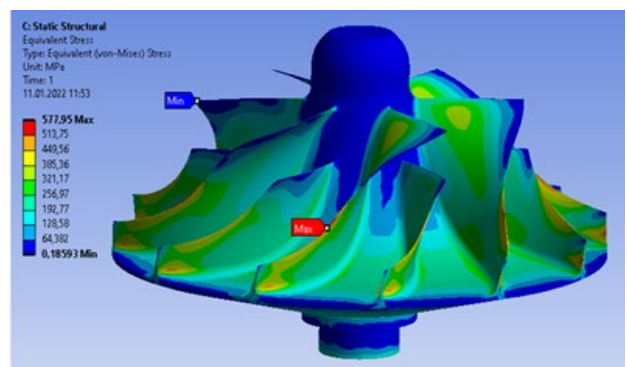
Table 3. Experimental Performance Test Results of the Original and Thickened Impeller.

Experimental Performance Test Data Results		
	Original impeller	0.1 mm offset impeller
Rotational Speed (ω)	33000 rpm	33000 rpm
Mass Flow Rate (\dot{m})	1.51 kg/s	1.53 kg/s
Volume Flow Rate (Q)	1.33 m ³ /s	1.26 m ³ /s
Inlet Pressure (P1)	1.02 bar	1.03 bar
Discharge Pressure (P2)	2.15 bar	2.11 bar

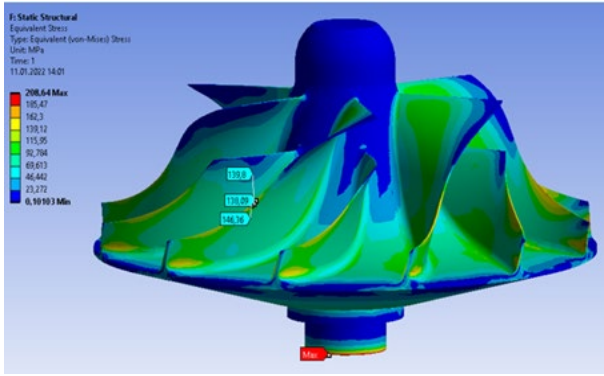
Pressure Ratio (P2/P1)	2.11	2.06
Inlet Temperature (T1)	13.9 °C	12.3 °C
Discharge Temperature (T2)	101.9 °C	96.8 °C
Temperature Ratio (T2/T1)	7.33	7.87
Polytropic Exponent (η)	1.60	1.57
Polytropic Efficiency (η_p)	79.50%	79.60%

3.3. Fluid-Solid Interaction (FSI) Results

Based on the results of the FSI, the original impeller experienced some type of deformation or fracture. Figure 6(a) shows the highest value of the Von-Mises stress on the impeller, which is 577.95 MPa. As previously stated, the yield strength of AL T6 7075 is 493 MPa. This indicates that the stress exerted on the original impeller significantly exceeds the yield stress of the material. The fracture location depicted in Figure 2 is similar to where the maximum stress point is shown in Figure 6(a). The total deformation of the original impeller shows a maximum value of 1.3mm. Since the yield stress of the material was exceeded, the blade tips will not go back to their original shape because of the plastic deformation effect.



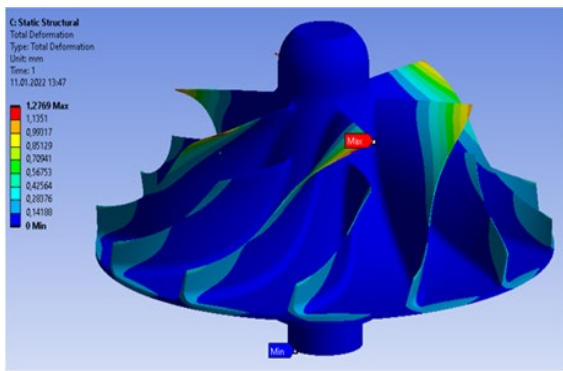
(a)



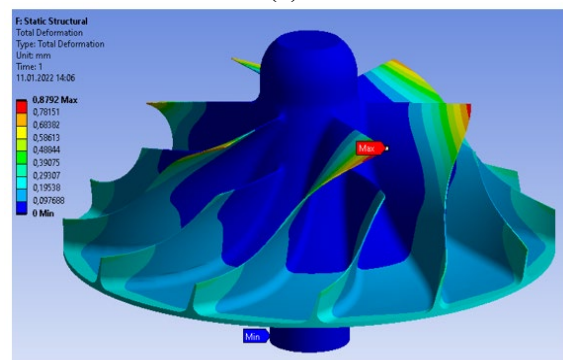
(b)

Figure 6. Von-Mises Stresses (a) Original Impeller, (b) Thickened Impeller.

The maximum Von-Mises stress exerted on the thicker impeller, on the other hand, is 208.64 MPa. This value is much lower than the yield stress of the material, which is 493 MPa. In addition, the total deformation decreases significantly from 1.3mm to 0.9mm. These results show us that the thicker impeller will experience only elastic deformation.



(a)



(b)

Figure 7. Total Deformation (a) Original Impeller, (b) Thickened Impeller.

3.4. On Site Performance Testing Results

Both impellers were produced at the HAUS facility and tested using the HAUS XMP122 turbo blower in accordance with ISO 5167 [8] specifications.

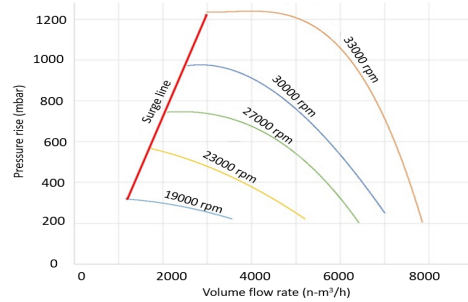


Figure 8. Experimental Performance Map of Original Impeller.

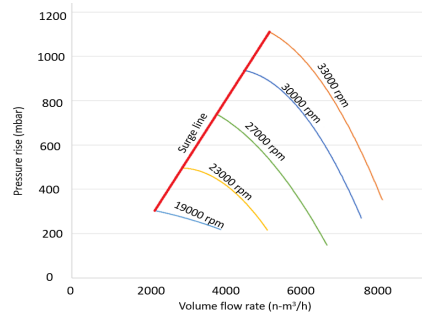


Figure 9. Experimental Performance Map of Thickened Impeller.

Performance maps were created for both impellers to identify any performance discrepancies between them. Compared to the thickened impeller, the original impeller has a slightly greater volume flow rate working range as shown in Figures 8 and 9. At 33,000 rpm, the thickened impeller cannot reach 1200 mbar before reaching the surge point, but the original impeller may run slightly above 1200 mbar before reaching the surge point. On the performance map in Figure 9, the thicker impeller's surge line has shifted to the right. This indicates that the thickened impeller will be subjected to surge events sooner than the original impeller.

4. CONCLUSION

There is an overall improvement in the structural strength of the thickened impeller. It is demonstrated that the thicker impeller can endure higher mechanical and hydrodynamic loads. However, the impeller slightly decreased the performance of the machine. Compared to the original impeller, the volume flow rate has also decreased. This is due to the smaller passage area which directly influences the volume flow rate.

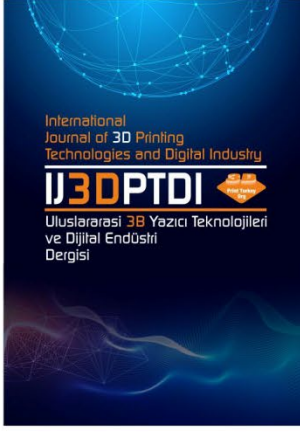
According to the CFD data, the polytropic efficiency of the thickened impeller increased from 75.8% to 86.57%. The volume flow rate

reduced from 4211.3 m³/h to 3658.3 m³/h when the thicker impeller was utilized. Based on the collected data, it was found that increasing the thickness of the blade decreases the forces operating on the blade.

In addition to a minor change in the volume flow rate, the polytropic efficiency was proven to have increased. Consequently, it can be concluded from this study that thickening the impeller had an overall favorable effect, since it can function under the same conditions as the original impeller with the minor effects on the overall performance. By applying CFD software, the time and the expenses were reduced required to produce and test the six distinct impellers. From this experimental study, the same techniques were used for the other HAUS turbo blower models and improve and optimize the service life of the impellers.

REFERENCES

1. Friedrich-Karl, B., Hans Josef, D., Ji, P., Sebastian S., Bo, W., "A comparison of one-way and two-way coupling methods for numerical analysis of fluid-structure interactions", *Journal of Applied Mathematics*, Vol 2011, 2011.
2. Gu, Y., Pei, J., Yuan, S., Xing, L., Stephen, C., Zhang, F., Wang, X., "Effects of blade thickness on hydraulic performance and structural dynamic characteristics of high-power coolant pump at overload condition", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol 232, Issue 8, 2018.
3. Lee, K., Huque, Z., Kommalapati, R., Han, S.E., "The Evaluation of Aerodynamic Interaction of Wind Blade Using Fluid Structure Interaction Method", *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol 3, Issue 4, Pages 270-275, 2015.
4. Gong, B.L., Jia, X.J., Wang, G.C., Liu, Z.W., "Study on application of CAE in a centrifugal compressor impeller", *Advanced Materials Research (AMR)*, Vol. 787, Pages 594-599, 2013.
5. ISO 5389 (2005) Turbo compressor- performance test code second edition, 2005.
6. Zheng, X., Ding, C., "Effect of temperature and pressure on stress of impeller in axial-centrifugal combined compressor", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol 8, Issue 6, Pages 1-11, 2016.
7. Zheng X, Jin L, Du T, Gan B, Liu F, Qian H., "Effect of temperature on the strength of a centrifugal compressor impeller for a turbocharger", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol 227, Issue 5, Pages 896-904, 2012.
8. ISO 5167 (2003) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 4: Venturi tubes, 2003.



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>

EĞİTİM VE ARAŞTIRMA AMAÇLI ÜÇ BOYUTLU (3B) BASKILI KARACİĞER FANTOM TASARIMI

3D PRINTED LIVER PHANTOM DESIGN FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES

Yazarlar (Authors): Fahrettin Fatih KESMEZACAR*^{ID}, Nami YEYİN^{ID}, Özge DEMİR^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Pekşen M.F., Taşçı T., Uyaroğlu Y., "Eğitim ve Araştırma Amaçlı Üç Boyutlu (3B) Baskılı Karaciğer Fantom Tasarımı" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 175-183, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1255492

Araştırma Makale/ Research Article

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

EĞİTİM VE ARAŞTIRMA AMAÇLI ÜÇ BOYUTLU (3B) BASKILI KARACİĞER FANTOM TASARIMI

Fahrettin Fatih KESMEZACAR^{a*}, Nami YEYİN^b, Özge DEMİR^c

^aİstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, TÜRKİYE

^bİstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, Nükleer Tıp Ana Bilim Dalı, TÜRKİYE

^cİstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler Ve Termodinamik Ana Bilim Dalı, TÜRKİYE

*Sorumlu Yazar: f.kesmezacar@iuc.edu.tr

(Received: 23.02.23; Revised: 04.06.23; Accepted: 05.07.23)

ÖZ

Son yıllarda, üç boyutlu (3B) yazıcı sağlık alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Normal ölçülerdeki bir insan vücudundaki, organları orijinal boyutlarında elde etmek için 3B teknolojisinden yararlanılmaktadır. Çalışmada öğrenci eğitiminde ve çok amaçlı araştırmalarda kullanılmak üzere, içinde patolojik bir karaciğer modeli olan fantom dijital ortamda tasarlanıp 3B olarak basılmıştır.

Tasarlanıp basılan model insan anatomisine uygun olup, üzerinde karaciğer organında görülen anatomik özelliklerin çoğu çeperinde tasarlanmış ve ek olarak safra kesesi trasesine uygun olarak modellenmiştir. Fantomun çeper bölümünün haricinde model iç bölümünde iki ayrı kanalla dışarı açılan birbirinden bağımsız 2 boşluk yer almaktadır. Boşluklardan biri küre formunda tümör boşluğu diğeri ise parankim boşluğudur. Fantomda, tümöral ve periferik boşluk radyolojik ve nükleer tıp araştırma ve eğitimlerinin sağlanması için tasarlanmış olup içine radyonüklit ve gerekli sıvıların doldurulmasına uygun olarak basılmıştır. Modelimizin nükleer tıp, radyoloji, fizik ve anatomi eğitim ve araştırmalarında aktif olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karaciğer Fantomu, 3B Baskı, Anatomi.

3D PRINTED LIVER PHANTOM DESIGN FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES

ABSTRACT

In recent years, three-dimensional printers (3D printers) have been widely used in health care. 3D technology is used to preserve organs in a human body of normal size in their original dimensions. In this study, a phantom with a pathological liver model was designed in a digital environment and 3D printed for use in undergraduate education and multi purpose research. The designed and printed model is suitable for human anatomy, most of the anatomical features of the organ liver are shown on its wall, and the gall bladder is also modeled according to its trace. Apart from the periphery of the phantom, there are 2 independent spaces that open with two separate channels in the inner part of the model. One of the cavities is the spherical tumor cavity, the other is the parenchymal cavity. The tumor and peripheral cavity of the phantom is used for radiological and nuclear medicine research and training and is printed according to the filling with radionuclides and the required fluids. It is envisaged that our model will be actively used in nuclear medicine, radiology, physics and anatomy education and research.

Keywords: Liver phantom, 3D Printing, Anatomy.

1. GİRİŞ

3 Boyutlu (3B) basım teknolojisi, üç boyutlu dijital verilerden karmaşık geometrik özelliklere sahip fiziksel nesnelere oluşturmak için katmanlı üretim anlamına gelir. 3B baskı olarak bilinen katmanlı üretim, malzemelerin bir alt tabaka üzerine veya içine birleştirilmesi veya biriktirilmesiyle nesnelere oluşturulabileceği bir üretim yöntemidir [1-2]. Sağlıkta bu teknolojinin tercih edilmesinin sebebi ise, ihtiyaç duyulan tıbbi ürünün geliştirilmesinde ve üretilmesinde diğer seçeneklere göre hızlı ve düşük maliyetli olmasıdır. Ayrıca bu teknoloji hasta için çok önemli olan, kişiye özel tıbbi 3B baskılarda öne çıkmaktadır [3]. 3B baskı teknolojisinde ürünlerden beklenen performans alınmaktadır. Üretilen tıbbi modeller, insan vücudunu benzer şekilde ve fiziksel özelliklerini gösterebilmelidir. Ayrıca bu modellere gereği durumunda talep edilen uygun patolojiler ve deformasyonlar eklenebilmektedir [4-6]. 3B baskı ile üretilen tıbbi ürünler 2022 yılına kadar yaklaşık 26 milyar dolarlık bir pazara ulaştığı tahmin edilmektedir [7]. 3B baskı kavramı ilk olarak 1986 yılında Charles tarafından tanımlanmıştır [8]. Son on yılda ise, 3B baskı teknolojisinin önemli bir göstergesi olan baskı doğruluğu, baskı verimliliği ve baskı hızı büyük ölçüde gelişmiştir [9-10]. 3B baskı teknolojisi, kişilerin hastalığına dayalı olarak belirli tıbbi cihazların imalatında yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu ürünlerde en başta tıbbi modeller, kişiselleştirilmiş ve işlevselleştirilmiş implantlar gelmektedir. 3B modellerle, hasta lezyonlarının görsel grafikleri doktorlara ve hastalara gösterilebilen tıbbi görüntüleme teknolojisinin sınırları zorlanmaktadır. Bu 3B modeller, elle hissedilebilen ve hastaların durumunu gerçekçi olarak gösteren somut nesnelere sahiptir. Bu teknoloji klinik tıbbi eğitim ve öğretim, tanı ve cerrahi planlama için daha sezgisel, kullanışlı ve vazgeçilmez duruma gelmiştir. Bugüne kadar, kafatası, kalp, pelvis, kan damarı ve tümör gibi; cerrahi yardım, hastalık analizi ve eğitim-öğretim malzemesi için çeşitli 3B baskı teknolojileriyle bir dizi tıbbi modeller üretilmiştir [11]. 3B baskılı hastalık modeli, cerrahi yardım ve hastalık analizi, insan vücudu ve patolojik anatomi gibi tıp eğitiminin

temel konuları olmak üzere klinik tıp öğretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Son yıllarda, hasta güvenliği ve risklerini azaltmaya yönelik çabalar artmıştır. Bu nedenle, simülasyon klinik eğitimde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Özellikle tanısal ve girişimsel prosedürlerde, asistanların tıbbi uygulamaları ilerletmeleri için uygun eğitime önem verilmektedir. Güvenlik amacıyla 3B simülatörler üzerinde biyopsi veya ablasyona yönelik girişimler konusunda eğitim verilmektedir. 3B baskı ile üretilmiş simülatörlerin kullanımı, öğrenme deneyimindeki gelişmeler ve hasta güvenliğinin artması gibi birçok fayda sağlamaktadır [13].

3B teknolojisinin eğitim ve araştırmada kullanıldığı bilimlerin arasında radyasyon onkolojisi, radyoloji, nükleer tıp gibi klinik bilimler ve anatomi, fizyoloji gibi temel bilimlerde yer almaktadır [14]. Nükleer tıp görüntüleme sistemleri genel olarak fiziksel fantomlarla doğrulanmaktadır. Bu fantomlar, kalıplama teknikleriyle üretilen ve daha sonra radyoaktif sıvılarla doldurulan içi boş küre ve silindirlerdir. 3B baskı teknikleri ile basılan fantomların, standart kalıplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha efektif olmasının sebebi farklı organlar ve düzensiz tümör lezyonları gibi ince yapılara sahip antropomorfik yapıların hazırlanmasına olanak sağlamalarıdır [15]. 3B baskılı fantomların kullanımına sırayla bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve ultrason (US) ile başlanmıştır. Ardından Pozitron Emisyon Tomografi (PET) ve Tek Foton Emisyon Bilgisayarlı Tomografi (SPECT) bunları takip etmiştir. Fantomlar, görüntüleme tekniklerinin test edilmesi ve cihaz tarafından yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde pratik yaklaşımlar sunmaktadır [16]. Fantomlar aynı zamanda sağlık fizikçilerinin akreditasyon sınavlarında bir muayene aracı olarak da geliştirilmiştir [17]. SPECT görüntüleme ve PET görüntülemenin cihaz karakterizasyonu ve yöntem testleri de fantom kullanılarak yapılmaktadır [18]. Fantomlar tıbbi görüntülemede kalite güvencesi, kalibrasyon,

araştırma, eğitim ve öğretim için de kullanılmaktadır [19]. Eğitim fantomları tıp öğrencileri, sağlık fizikçileri, nükleer tıp teknikleri, nükleer tıp asistanları ve radyoloji asistanları için kullanılabilir [20]. Fantomlar ayrıca simüle edilmiş verilerin doğrulanmasında, radyonüklid tedavilerin planlamasında ve görüntüleme cihazlarının kalitesinin gösterilmesi içinde tasarlanabilir [21].

Çalışmanın amacı, araştırmalar ve eğitimlerde kullanılacak olan, insan anatomisine benzer, patolojik olarak içinde tümör kitlesi içeren SPECT, PET, MRG ve BT uyumlu anatomik karaciğer fantomu tasarlamak ve 3B basımını yapmaktır. Çalışmada, anatomik, tümürlü karaciğer fantomu hem bir kalite güvence cihazı hem de eğitim öğretim aracı olarak tasarlanmıştır. Karaciğer fantomunun kendine özel olan iç formu ve dışı açılan vana ve tıparları sayesinde anatomik karaciğer modeline istenildiği kadar radyonüklid verilip, güvenli olarak görüntüleri alınabilmektedir. Bu görüntüler asistan ve tekniker eğitiminde kullanılabilir. Ayrıca fantom Nükleer Tıp doktorları için bir öğretim aracı ve referans kaynağı olarak da tasarlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Fantom Malzemesi Seçimi ve Baskı Tekniği

Çalışmada, içinde tümör olan patolojik bir karaciğer modeli (fantom) dijital ortamda tasarlanmış ve 3B olarak basılmıştır. Fantomun yüzey anatomisinin tasarımıyla beraber, çalışmamıza özgünlük kazandıran, organ modeline radyonüklidi güvenli ve kolayca transfer edip, görüntü almayı sağlayan özel bir iç tasarım düşünülmüştür. Modelde kullanılacak malzemenin sintigrafik görüntülemeye uygun özelliklerde olması, vücut dokularına benzer farklı foton saçılması ve foton soğurması yapması, radyoaktif kontaminasyona yol açmaması için sızdırmaz özellikte olmasının sağlanması planlanmıştır. Tüm bu özelliklerin araştırması için kimya mühendisliği ile iş birliği yapılmıştır.

Anatomik karaciğer fantomu, 3B yazıcı ile basılacağı için yazıcı seçimine özel önem verilmiştir. 3B yazıcıların baskı teknikleri, aynı anda farklı malzemeler kullanılarak baskı yapımları ve kullanılan filamentlere göre değişiklik göstermektedir. Çalışmada tasarımı

planlanan fantom içerisinde çeşitli doku yoğunlukları bulunur (karaciğer yapısı ve boşluk). Her bir doku yoğunluğunun Hounsfield Unit (HU) değeri de farklı olduğu için 3B yazıcıda kullanılacak malzemelerin HU numaralarının bilinmesi gerekmektedir [22]. Literatürdeki çalışmalara göre mevcut baskı malzemelerinde her malzemenin HU numarasını belirlemek için kübik test nesnelere basılarak bir BT tarayıcıda taranması gerekmektedir. Çalışmada 3B malzeme ile üretmeyi planladığımız karaciğerin, bilgisayarlı tomografisi çekildiğinde yoğunluk ve HU açısından insanı taklit etmesi için uygun olan malzeme araştırılmıştır. Fantom basımında karaciğer parankim dokusunun HU değerinin normal insan karaciğer parankim doku HU değerlerine yakın olması malzeme seçim kriterlerinden biri olarak alınmıştır.

Değerlendirmeye alınan farklı marka ve malzemelerden üretilmiş modeller arasında Fillamentum Poliaktik Asit (PLA) malzeme kullanılarak, açık kaynaklı Cura (Ultimaker, Geldermalsen, Hollanda) yazılımında 3B baskı işlemi için hazırlandı. Masaüstü Fused Deposition Modeling (FDM) Ultimaker S5 3B yazıcıda basıldı.

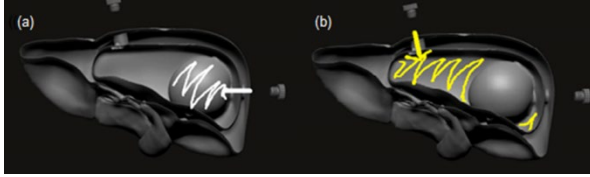
2.2. Fantom Tasarımı

Modelin iç tasarımının oldukça karmaşık olması ve kullanılan malzemenin sızma ihtimalinin olmaması için modelin en uygun olarak 3B baskı ile yapılabileceğine karar verildi. Fantomun tasarımında önemli noktalar: fantomun tam anlamıyla anatomik ve vücuttaki yerine uygun olması, fantomun iç bölgesine radyonüklitin rahatça doldurulup boşaltılabilen sızdırmaz bir aralığın olması, dolu iken malzemenin düşük su emme özelliğine sahip olup ve vida-contaların güvenli olması, kullanılan materyallerin oluşturulması istenen dokuya benzer olmasıdır.

Tasarımın kesit görüntüleri incelendiğinde, sağ dış yan çeperine bir kanalla açılan küre tümör kitlesini taklit etmektedir. Dış tarafa açılan kanaldan tümör içine radyonüklit veya kontrast madde transferi emniyetli olarak yapılabilecek özelliktedir. Boş kürenin hemen dışında parankim dokusunu oluşturan içi boş ayrı bir bölüm yer almaktadır. Burası parankim boşluğunun üst tarafında yer alan bir kanal ile dışarı açılmaktadır. Bu kanaldan da yine gerekli oranda radyonüklit veya kontrast

madde organ parankim bölgesine verilebilecektir. Her iki boşluğa da radyonüklit verildikten sonra emniyetin sağlanması için vidalı kapaklar özel vida ve contalarla emniyetli olarak kapatılabilecek özelliklerde tasarlanmıştır (Şekil 1).

Karaciğer modeli, Zbrush 3B grafik tasarım programında basılmak üzere dizayn edilmiştir. Zbrush yazılımı, gerçek zamanlı 3B modelleme ve boyama yapabilen ve kendine özel modelleme araçları ile yüksek ayrıntılı ve gerçekçi organik modeller üretmeye imkân sağlayan bir programdır.



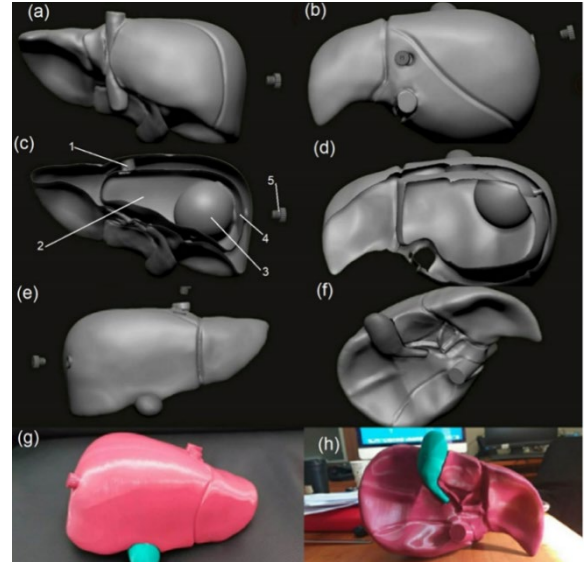
Şekil 1. Modelin frontal plan kesitinin arkadan görünümü. (a) Tümör kitlesine modelin dışından, kapağı açılıp kapatılabilen bir kanaldan radyonüklit doldurulması. (b) Karaciğer parankim dokusuna model dışından, kapağı açılıp kapatılabilen bir kanaldan radyonüklit verilmesi.

3. BULGULAR

Karaciğer modeli önden incelendiğinde organın sağ ve sol loblarındaki boyut farklılıkları ve modelin ventralinde yer alan safra kesesinin fundus bölümü görülmektedir. Sağ dış yanda tümör boşluğuna açılan kanalın giriş noktası ve bu kanalın emniyetli olarak kapanmasını sağlayan vidalı kapak; üstte de parankim boşluğuna açılan kanal girişi ve vidalı kapak bulunmaktadır. Modelin anatomik olarak karaciğere birebir benzemesi için organ çerperinde komşuluklarından oluşan çukurlaşmaların ve çıkıntıların tasarlanmasına özen gösterilmiştir. Arkadan görünen vücudun alt bölümünün venöz kanını kalbe taşıyan, organın içine gömük bir formda bulunan vena cava inferior yer almaktadır. Bu büyük damarın sol yanında öne doğru bir girinti oluşturan aorta'nın geçiş olduğu bulunmaktadır. Sol triangüler ligamentin tutunduğu sol uçtaki çıkıntı net olarak görülmektedir (Şekil 2).

Modelin ventralden tasarımında anatomik oluşumların çeşitliliği, fazlalığı ve komşuluklardan kaynaklanan çukurlaşmalar bulunmaktadır. Yeşil rengiyle safra kesesi, orijinal anatomik trasesiyle tasarlanmıştır. Karaciğer'in önemli noktalarından birini oluşturan organa giren arter, ven ve çıkan safra

yolları da ventralden gözlenmektedir. Karaciğer loblarını besleyen a. hepatica propria ve bu arterin iki dalı, a. hepatica dextra ve sinistra, yer almaktadır. Arterlerin yan tarafında karaciğere giren ana ven, vena porta hepatis'te seçilebilmektedir. Safra kesesinden çıkan safra kanalı yeşil olarak görülmektedir. Ventralden vena cava inferior'un kesiti organın arka duvarında bulunmaktadır. Tasarım sırasında, modelin altında dikkat çeken çukurlaşmalar ise; sol tarafta midenin oluşturduğu çukurlaşma, sağda safra kesesinin yanında böbrek, kalın barsak ve 12 parmak barsağı çukurlaşmaları net olarak izlenebilmektedir. Safra kesesinin ön ve arkasında ise lobus quadratus ve lobus caudatus görülmektedir.



Şekil 2. (a) Karaciğer tasarımının arkadan görünümü, modele arka dış yandan bakıldığında tümör boşluğuna açılan kanalın giriş noktası ve bu kanalın emniyetli olarak kapanmasını sağlayan vida kapak görülmektedir. (b) Tasarımın üstten görünümü, tümör haricindeki bölüme radyonüklit akışını sağlayacak olan kanal çıkışı görülmektedir. (c) Karaciğer frontal plan kesitinin arkadan görünümü; parankim boşluğa açılan kanal (1), parankim boşluk (2), içi boş tümör kitlesi (3), dış yandan tümör boşluğuna açılan kanal (4), kanalın emniyetle kapanmasını sağlayan kapak (5). (d) Karaciğer horizontal plan kesitinin üstten görünümü. (e) Model tasarımına önden görünümü. (f) Model tasarımının ventralden görünümü (g) Karaciğer modelinin önden görünümü (h) Karaciğer modelinin ventralden görünümü.

Değerlendirmeye alınacak farklı malzemelerden üretilmiş modeller açık kaynaklı Cura (Ultimaker, Geldermalsen, Hollanda) yazılımı kullanılarak 3B baskı

işlemi için hazırlandı ve farklı 3B malzemeler kullanılarak masaüstü FDM Ultimaker S5 3B yazıcı ile basıldı. HU değerlendirmelerini yapmak için malzemelerin Bilgisayarlı Tomografi görüntüleri çekilerek ROI'ler üzerinden HU değerlendirmesi yapıldı. Yapılan HU değerlendirmesi sonucu, karaciğerin baskı malzemesi olarak Polylactic Acid (PLA) Ultimaker malzeme kullanılmasına karar verildi. Çünkü deneme malzemeleri içerisinde 58 HU ile karaciğer'e en yakın olarak PLA malzemesi bulundu. Gerçek insan karaciğeri HU değeri 58'dir [23]. Çalışmada tasarlanan ve basımı gerçekleştirilen fantomda 30 mm çapında küresel şekilli tümör hacmi 66 cm^3 ve sağlıklı karaciğer dokusunu temsil eden kısmın 789 cm^3 hacimdedir. Modelimizin boyutları dış yandan iç yana 35 cm, yukardan aşağı 19 cm ve önden arkaya 18 cm'dir.

4. TARTIŞMA

3B baskı teknolojisi ile birlikte bilgisayar ortamındaki dijital modeller somut nesnelere halinde üretilebilmektedir. Tüm sektörlerde olduğu gibi sağlık sektöründe de 3B baskı teknolojisindeki yaygınlaşma öne çıkmaktadır. Hızlı prototipleme ile baskı teknolojisi sağlıkta pek çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Kişilere veya ihtiyaca özel üretim yapılabilmesi nedeniyle 'butik üretim' olarak da adlandırılabilen bu teknolojinin başlıca kullanım alanları; doku ve organ üretimi, ortez-protez-implant üretimi, cerrahi planlama ve radyolojik uygulamalar, cerrahi enstrüman üretimi, eğitim uygulamalarıdır [24]. Cerrahi planlamada 3B baskı oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Beyin, kalp gibi karmaşık organlardaki veya pelvis, omurga gibi anatomik bölgelerdeki kusurların anatomi ve fizyolojisini incelemeyi ve bilgileri cerrahi planlama için kullanmayı içermektedir. 3B modeller; cerrahların ameliyattan önce bozulmuş organları incelemesine, çeşitli yaklaşımları keşfetmesine ve ameliyathaneye girmeden önce uygulamalı deneyim kazanmasına yardımcı olmaktadır. Bu süreç operasyon süresini önemli ölçüde kısaltır ve sonuç olarak hasta ve cerrahlar için operasyonun sonucunu iyileştirir. Protez teknolojisinde de 3B'ye sıkça rastlanmaktadır. Hastaya özel 3B anatomik hassas protezlerdeki son gelişmeler, bir kazadan veya genetik bir deformiteden etkilenen çok çeşitli engelli

kişilerin normal yaşamlarına devam etmelerine olanak sağlamaktadır [25].

Fantomların sıkça kullanıldığı radyasyon onkolojisi ve nükleer tıp gibi bilim dallarında, günümüzde kullanılan mevcut fantomların çoğu, dozimetri ölçümlerinin sonuçlarını etkileyebilecek ilkel geometrik formlara sahiptir. Radyasyon dozimetrisi fantomlarının temel amacı, radyasyonun insan vücudundaki belirli bir organın dokusu içinde soğurulmasını ve saçılmasını taklit etmektir. Fantomlar, test edilen organın şekline sahip olmalı; malzeme ve şekil, radyasyona maruz kaldığında vücut dokusunun hareketini simüle etmelidir. Uluslararası Radyasyon Birimleri ve Ölçümleri Komisyonu'na (ICRU 96) göre [26], klinik dozimetriyi kullanmanın amacı, istenen organa doğru radyasyon iletimini sağlamaktır. Radyasyon dozimetrisinde, bu amaca ulaşmak için ana iki kalıp; doğru radyasyon dozu ve şekil hassasiyetidir [27]. Bununla birlikte, vücuda doz dağılımının araştırılması önem taşımaktadır. İnsan vücudunun doğru şeklini ve boyutunu simüle etmek için birçok antropomorfik fantom prototipi üretilmektedir. Doz birikimi vücut içindeki saçılma koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, saçılma yollarının uygun şekilde modellenmesi gerekir. Dolayısıyla ilgilenilen organa verilen radyasyon dozunun doğru olarak değerlendirilmesi için organ şekli ve bölge anatomisi önem taşımaktadır [28].

Karaciğer fantomunu tasarlarken anatomik forma, modelin komşuluklarına ve organlarla olan temasına önem verilmiştir. Araştırmamızda bu temel noktalara dikkat etmemizin sebebi araştırma ve eğitimlerimizde kullanacağımız radyonüklit saçılımının uzaklık, yoğunluk ve hareketten direkt olarak etkilenmesidir. Ayrıca modelin iç bölgesinde iki farklı bölüm bulunmasının nedeni, modelin parankim dokusunun alacağı radyasyon dozunun, tümör dokusunun aldığı doz miktarından farklı olmasıdır.

Allsabbagh ve ark., [29] tiroid bezi üzerinde dozimetri ve görüntü kalitesi için yaptıkları fantom çalışmasında, makalemize benzer şekilde organın anatomik ölçülerine özen göstermiş, modelin içini boş olarak 3B bastırmıştır. Karaciğer prosedürlerinde başarıya ulaşabilecek ideal bir karaciğer fantomu geliştirmek için çeşitli materyaller

kullanılmıştır. Karaciğer fantomunu tasarlarken mutlaka gerçek karaciğer organının anatomisi ve yapısı dikkate alınmalıdır [30].

Aynı zamanda 3B baskı veya hızlı prototipleme üretimi, karmaşık varlıkları yüksek doğrulukla üretebilen uygulanabilir eğitim araçlarından biri olmuştur [31]. 3B baskı, tıp alanında onlarca yıldır geliştirilip kullanılmıştır [32-33]. Arter, ven ve trakeal bronş ve pulmoner segmentlerle birlikte akciğerin fiziksel modelleri 3 boyutlu olarak basılmıştır [34]. Ardından, vasküler ve safra yapılarının karmaşık ağlarına sahip fiziksel karaciğer modelleri de donör karaciğer transplantasyonunda preoperatif planlama için 3B yazdırılmıştır [35]. Çalışmamızda aynı zamanda, anatomik eğitime etkilerini iyileştirmek için 3B anatomik tümörlü karaciğer modeli geliştirilmiştir. Fantomun tasarımı sırasında makro anatomik görünüme özen gösterilmesinin nedeni iyi bir karaciğer eğitim fantomunun gerçek hastaların tarama kazanımlarını yakından taklit etmesidir. Modelin yüzey bölgelerinin, organın abdomende bulunduğu topografik bölgelere uyumlu olması sağlanmıştır. Anatomik komşulukları ve komşuluklarından doğan çukurlaşmalar modelde gösterilmiştir. Bunun sebebi araştırmanın daha sonraki kısımlarında, 3B basılması düşünülen komşu organların (akciğer, kalp gibi) fantomlarıyla birebir uyum sağlaması ve doğru etkileşimlerde bulunmasıdır.

Tıp hekimleri ve sağlıkçıların eğitimi için kadavra kullanımı, tedarik sebebiyle oldukça sıkıntılıdır. Bunun başlıca sebebi etik sorunlar ve maliyetin çok yüksek olmasıdır. Kadavraya ulaşımın zor olduğu günümüzde, 3B baskı teknikleri, birçok vaka için yüksek çözünürlüklü BT görüntülemeyle doğru karmaşık anatomik organları yeniden üreterek yeni ve etkili bir eğitim sunabilir. 3B baskının herhangi bir anatomik nesnenin çok sayıda kopyasını farklı boyutlarda üretebilmesi, eğitim için büyük avantaj sağlamaktadır [36]. Mc Menamin ve ark. eğitim amacıyla insan anatomik nesnelerinin 3B baskılı kopyasının doğruluğunu doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen önemli unsurları araştırmıştır [37]. Çalışmada, diğer alternatiflerle karşılaştırmalı olarak 3B baskılı bir kopya yapmanın maliyeti araştırılmış ve sonuçta 3B baskının tıp eğitiminde insan örneklerini çoğaltmak için en

hızlı ve ekonomik teknik olduğu sonucu çıkmıştır.

3B modeller asistan eğitiminde de öne çıkmaktadır. Eğitimlerden biri olan karaciğer üzerine yapılan girişimler için karaciğer fantomuna ihtiyaç duyulmaktadır. Eğitimler kişilerin uygulamalarını iyileştirmeye ve geliştirmesini sağlamaktadır. Perkütan biyopsiler ve karaciğer rezeksiyonu gibi uygulamalar gerçek hasta üzerinde uygulanmadan önce tıbbi becerisini geliştirmek için fantom üzerinde yapılmaktadır. Böylece hasta güvenliği artmış, kaza ve hata riski azalmıştır. Ayrıca, karaciğer anatomisinin (organlar, safra kanalları, hepatik arterler, portal damarlar) karmaşık tasarımı nedeniyle, fantomlar ayrıntılı olarak tasarlanmalıdır [38-39].

Çalışmada Pacioni ve arkadaşlarının belirttiği şekilde karaciğer anatomisini önemi vurgulanmış ve ventral bölümünde yer alan anatomik olguların, çukurlaşmaların, girinti ve çıkıntılarının tasarımına ve basımına özen gösterilmiştir [13].

Özel olarak tasarlanmış fantomlar, hasta raporlama ve tedavilerinin kalite güvencesini artırmaya ve mükemmel deneme verileri toplamaya yardımcı olmaktadır [40].

3B fantomlar görüntüleme ve tedavi sistemlerinin kontrolü ve organlara olan etkilerini incelemek içinde tasarlanır. Nükleer tıpta, fantom oluşturma temel amacı istenilen fonksiyonun bu fantom üzerinde simülasyonunun gerçekleştirilmesidir.

Fantomlar dozimetri ve görüntüleme fantomları olmak üzere genel olarak iki sınıfta incelenebilir. Dozimetre fantomlarının tasarlanma amacı, teşhis veya tedavide vücudun belli bir bölgesinin maruz kaldığı radyasyon oranının belirlenmesidir. Görüntüleme fantomları ise sistemler tarafından alınan görüntülerin kalitesi ve doğruluğunun değerlendirmesini amaçlar. Model üretimindeki temel amaç istenilen fonksiyonların bu model üzerinde gerçekleştirilebilmesidir. Radyonüklitlerin sıkça kullanıldığı sağlık fiziği ve nükleer tıp gibi bilim dallarındaki deneylerde ve eğitimde fantom kullanımı kaçınılmaz olmaktadır [41]. Robinson ve ark. 2 karaciğer, dalak, böbrekler

(yetişkin, 5 yaş ve 10 yaş) ve pankreastan oluşan fantomlar geliştirdi [42]. Fantomların içerisine Tc-99m perteknetat ya da Lu-177 (Lutesyum-177) Dotatate içeren salin ile doldurularak fantomların SPECT/CT görüntüleri alınmış ve 3B baskılı organlar için SPECT kalibrasyon faktörleri belirlenmiştir. Tran-Gia geometrilere dayalı farklı kısmi hacim tekniklerini küresel ve elipsoid ticari fantomlarla karşılaştırmak için bir böbrek fantomu geliştirmiştir [43].

Tasarlanan tümörlü karaciğer modeli kullanılarak BT, MR, SPECT ve PET/BT çekimleri yapılabilecektir. Modelin görseli ile tıbbi görüntüleme cihazlarından alınan görüntüler iki boyutta incelenebileceği gibi tomografik görüntülerde aksiyal, sagittal ve koronal kesit görüntüleri de görsel olarak inceleyebilecektir. Bu yönü ile modelimizin faydalı bir eğitim materyali olabileceğini düşünüyoruz. Tasarımın diğer bir önemli amacı da radyonüklitin parankim bölge ve tümör üzerine olan salınımının miktarı belirli olarak verilen doza göre görüntüsünün netleşmesi ve ölçümünün yapılabileceği çalışmanın kişilere anlatılmasıdır.

5. SONUÇ

3B olarak tasarlanıp basılmış olan tümörlü karaciğer modeli anatomi, radyoloji ve nükleer tıp eğitiminde ve araştırmalarında efektif olarak kullanılabilir. Modelimize özgünlük sağlayan iç tasarımı sayesinde tümöre ve parankim dokuya direk olarak radyonüklit vererek karaciğer tümör tedavisi modellemesine ve tedavi dozimetrisi yapılabilmesine olanak sağlayabilecektir.

KAYNAKLAR

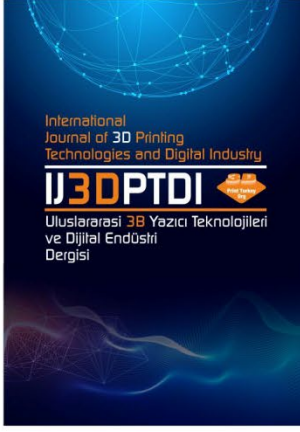
1. Kang, H.W., Lee, S.J., Ko, I.K., Kengla, C., Yoo, J.J., Atala, A., "A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity". *Nature Biotechnology*, Vol. 34, Issue 3, Pages 312–319, 2016.
2. Murphy, S.V., Atala, A., "3D bioprinting of tissues and organs", *Nature Biotechnology*, Vol. 32, Issue 8, Pages 773–785, 2014.
3. Rybicki, F.J., "Medical 3D printing and the physician-artist." *Lancet*, Vol. 391, Issue 10121, Pages 651–652, 2018.
4. Kuang, X., Wu, J., Chen, K., Zhao, Z., Ding, Z., Hu, F., et al., "Grayscale digital light processing 3D

printing for highly functionally graded materials", *Science Advances*, Vol. 5, Issue 5, Pages 1-9, 2019.

5. Grigoryan, B., Paulsen, S.J., Corbett, D.C., Sazer, D.C., Fortin, C.L., Zaita, A.J., et al., "Multivascular networks and functional intravascular topologies within biocompatible hydrogels", *Science*, Vol. 364, Issue 6439, Pages 458-464, 2019.
6. Liu, X., Tao, J., Liu, J., Xu, X., Zhang, J., Huang, Y., et al., "3D printing enabled customization of functional microgels", *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 11, Issue 13, Pages 12209–12215, 2019.
7. Ricles, L.M., Coburn, J.C., Di Prima, M., Oh, S.S., "Regulating 3D-printed medical products", *Science Translational Medicine*, Vol. 10, Issue 461, Pages eaan6521, 2018.
8. Hull, C.W., Spence, S.T., Lewis, C.W., Vinson, W., Freed, R.S., "Stereolithographic curl reduction". US Patent No:5.273.691, 1993.
9. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, Pages 172–196, 2018.
10. Bernal, P.N., Delrot, P., Loterie, D., Li, Y., Malda, J., Moser, C., et al., "Volumetric bioprinting of complex living-tissue constructs within seconds", *Advanced Materials*, Vol. 31, Issue 42, Pages e1904209, 2019.
11. Paul, G.M., Amin, R., Wen, P., Condoor, S., Parkar, N., King, W., et al., "Medical applications for 3D printing: recent developments", *Missouri Medicine*, Vol.115, Issue 1, Pages 75–81, 2018.
12. Höhne, C., Schmitter, M., "3D printed teeth for the preclinical education of dental students", *Journal of Dental Education*, Vol. 83, Issue 9, Pages 1100–1106, 2019.
13. Pacioni, A., Carbone, M., Freschi, C., Vigliani, R., Ferrari, V., Ferrari, M., "Patient-specific ultrasound liver phantom: materials and fabrication method", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 10, Issue 7, Pages1065–1075, 2015.
14. Yıldırım, G., Yıldırım, S., Çelik, E., "3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: bir içerik analizi", *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi*, Cilt 13, Sayı 25, Sayfa 163-184, 2018.
15. Kim, G.B., Lee, S., Kim, H., Yang, D.H., Kim, Y.H., Kyung, Y.S., et al., "Three-dimensional

- printing: basic principles and applications in medicine and radiology”, *Korean Journal of Radiology*, Vol.17, Issue 2, Pages 182–197, 2016.
16. Wang, K., Ho, C-C., Zhang, C., Wang, B., “A review on the 3D printing of functional structures for medical phantoms and regenerated tissue and organ applications”, *Engineering*, Vol. 3, Issue 5, Pages 653–662, 2017.
17. Branham, T., “Phantom testing”, *Medical Physics*, Vol. 34, Issue 6, Pages 2578-2578, 2007.
18. Di Francia, G., Scafè, R., De Vincentis, G., La Ferrara, V., Iourlaro, G., Nasti, I., et al., “Porous silicon phantoms for high-resolution scintillation imaging”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 569, Issue 2, Pages 197-200, 2006.
19. SabbirAhmed, A.S.M., Demir, M., Kabasakal, L., Uslu, I., “A Dynamic renal phantom for nuclear medicine studies”, *Medical Physics*, Vol. 32, Issue 2, Pages 530-538, 2005.
20. Als, C., Bräutigam, P., Mirzaei, S., “Sweet nuclear medicine phantoms for scintigraphic sentinel lymph node detection: a cooking recipe”, *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, Vol. 32, Issue 5, Pages 623-624, 2005.
21. Park, M-A, Zimmerman, R.E., Taberner, A., Kaye, M.W., Moore, S.C., “Design and fabrication of phantoms using stereolithography for small-animal imaging systems”, *Molecular Imaging and Biology*, Vol. 10, Issue 5, Pages 231- 236, 2008.
22. Solc, J., Vrba, T., Burianova, L., “Tissue-equivalence of 3D-printed plastics for medical phantoms in radiology”, *Journal of Instrumentation*, Vol. 13, Pages P09018, 2018.
23. Tisch, C., Brencicova, E., Schwendener, N., Lombardo, P., Jackowski, C., Zech, W-D., “Hounsfield unit values of liver pathologies in unenhanced post-mortem computed tomography.” *Internatiol Journal Legal Medicine.*; Vol. 133, Issue 6, Pages 1861-1867, 2019.
24. Emre, Ş., Yolcu, M.B., Celayir, S., “Üç boyutlu yazıcılar ve çocuk cerrahisi”, *Çocuk Cerrahi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 3, Sayfa 77-82, 2015.
25. Elahinia, M.H., Hashemi, M., Tabesh, M., Bhaduri, S.B., “Manufacturing and processing of NiTi implants: a review”, *Progress in Materials Science*, Vol. 57, Issue 5, Pages 911–946, 2012.
26. ICRU Report 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy, <https://www.icru.org/report/icru-report-96-dosimetry-guided-radiopharmaceutical-therapy/>, 2023
27. Leary, M., Kron, T., Keller, C., Franick, R., Lonski, P., Subic, A., et. al., “Additive manufacture of custom radiation dosimetry phantoms: An automated method compatible with commercial polymer 3D printers”, *Materials and Design*, Vol. 86, Issue 5, Pages 487-499, 2015.
28. Lehmann, J., Stern, R.L., Levy, J., Daly, P.T., Siantar, C.L.H., Goldberg, Z., “Radiation phantom with humanoid shape and adjustable thickness (RPHAT)”, *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 49, Issue 9, Pages 125-129, 2004.
29. Alssabbagh, M, Tajuddin, A.A., Abdulmanap, M., Zainon, R., “Evaluation of 3D printing materials for fabrication of a novel multi-functional 3D thyroid phantom for medical dosimetry and image quality”, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 135, Pages 106-112, 2017.
30. Ahmad, M.S., Suardi, N., Shukri, A., Mohammad, H., Oglat, A.A., Alarab, A., et al., “Chemical characteristics, motivation and strategies in choice of materials used as liver phantom: a literature review”, *Journal of Medical Ultrasound*, Vol. 28, Issue 1, Pages 7–16, 2020.
31. Wang, H., Liu, J., Zheng, X., Rong, X., Zheng, X., Peng, H., et al., “Three-dimensional virtual surgery models for percutaneous coronary intervention (PCI) optimization strategies”, *Scientific Reports*, Vol. 5, Pages 10945, 2015.
32. Tam, M.D., Laycock, S.D., Brown, J.R., Jakeways, M., “3D printing of an aortic aneurysm to facilitate decision making and device selection for endovascular aneurysm repair in complex neck anatomy”, *Journal of Endovascular Therapy*, Vol. 20, Issue 6, Pages 863-867, 2013.
33. Fu, M., Lin, L., Kong, X., Zhao, W., Tang, L., Li, J., et al., “Construction and accuracy assessment of patient-specific biocompatible drill template for cervical anterior transpedicular screw (ATPS) insertion: an in vitro study”, *Public Library of Science One*, Vol.8, Issue 1, Pages e53580, 2013.
34. Li, J., Nie, L., Li, Z., Lin L., Tang, L., Ouyang J., “Maximizing modern distribution of complex anatomical spatial information: 3D reconstruction and rapid prototype production of anatomical corrosion casts of human specimens”, *Anatomical Sciences Education*, Vol. 5, Issue 6, Pages 330-339, 2012.

35. Zein, N.N., Hanouneh, I.A., Bishop, P.D., Samaan, M., Eghtesad, B., Quintini, C., et al., "Three-dimensional print of a liver for preoperative planning in living donor liver transplantation", *Liver Transplantation*, Vol. 19, Issue 12, Pages 1304–1310, 2013.
36. Sheth, R., Balesh, E.R., Zhang, Y.S., Hirsch, J.A., Khademhosseini, A., Oklu R., "Three-dimensional printing: an enabling technology for IR", *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, Vol. 27, Issue 6, Pages 859–865, 2016.
37. McMenamin, P.G., Quayle, M.R., McHenry, C.R., Adams, J.W., "The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology", *Anatomical Sciences Education*, Vol. 7, Issue 6, Pages 479–486, 2014.
38. Krucker, T., Lang, A., Meyer, E.P., "New polyurethane-based material for vascular corrosion casting with improved physical and imaging characteristics", *Microscopy Research Technique*, Vol. 69, Issue 2, Pages 138–147, 2006.
39. Schindera, S.T., Torrente, J.C., Ruder, T.D., Hoppe, H., Marin, D., Nelson R.C., et al., "Decreased detection of hypovascular liver tumors with MDCT in obese patients: A phantom study", *AJR American Journal of Roentgenology*, Vol. 196, Issue 6, Pages 772–776, 2011.
40. Oglat, A.A., Matjafri, M.Z., Suardi, N., Oqlat, M.A., Abdelrahman, M.A., Oqlat, A.A., "A review of medical Doppler ultrasonography of blood flow in general and especially in common carotid artery", *Journal of Medical Ultrasound*, Vol. 26, Issue 1, Pages 3–13, 2018.
41. Özdemir, M., "Ultrasonografi eğitimi için balistik jelatin esaslı fantom geliştirilmesi ve özelliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Sayfa 31-32, 2018.
42. Robinson, A.P., Tipping, J., Cullen, D.M., Hamilton, D., Brown, R., Flynn, A.F., et al., "Organ-specific SPECT activity calibration using 3D printed phantoms for molecular radiotherapy dosimetry", *EJNMMI Physics*, Vol. 3, Issue 1, Pages 12–22, 2016.
43. Tran-Gia, J., Schlögl, S., Lassmann, M., "Design and fabrication of kidney phantoms for internal radiation dosimetry using 3d printing technology", *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 57, Issue 12, Pages 1998–2005, 2016.



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>

INFLUENCE OF ABRASIVE WATER JET TURNING OPERATING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF ABS AND PLA 3D PRINTED PARTS MATERIALS

Yazarlar (Authors): Fuat Kartal^{ID}, Arslan Kaptan*^{ID}



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kartal F., Kaptan A., “Eğitim ve Araştırma Amaçlı Üç Boyutlu (3B) Baskılı Karaciğer Fantom Tasarımı” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 184-190, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1247636

Araştırma Makale/ Research Article

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

INFLUENCE OF ABRASIVE WATER JET TURNING OPERATING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF ABS AND PLA 3D PRINTED PARTS MATERIALS

Fuat Kartal^a , Arslan Kaptan^{b*} 

^a Kastamonu University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering Department, TURKEY

^b Sivas Cumhuriyet University, Sivas Technical Sciences Vocational School, Motor Vehicles and Transportation Technologies Department, TURKEY

* Corresponding Author: akaptan@cumhuriyet.edu.tr

(Received: 04.02.23; Revised: 24.03.23; Accepted: 27.05.23)

ABSTRACT

In this study, PLA and ABS materials produced by 3D printing with 14 mm diameter and 300 mm length were processed by turning with abrasive water jet machining. The effect of processing parameters with abrasive water jet on the surface roughness was investigated. The processing parameters are nozzle feed rate (60-210 mm/min), abrasive flow rate (150-225 g/min), chuck turning speed (75, 125, 175 and 225 RPM) and nozzle distance (3, 5, 7 and 9 mm). Experimental studies have shown that the increase in nozzle feed rate (from 60 to 210 mm/min), abrasive flow rate (from 150 to 225 g/min) and nozzle distance (from 3 to 9 mm) results in average surface roughness values increased by 26%, 35% and 19%, respectively. It was concluded that the increase in the rotation speed of the mirror (from 75 RPM to 225 RPM) resulted in a 17% decrease.

Keywords: Abrasive water jet, Engineering plastics, ABS, PLA, Surface roughness, 3D printing.

1. INTRODUCTION

Poly(lactic acid) (PLA) and acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) are the two most common fused deposition modeling printing materials. Both soften when heated and can be easily remolded and recycled. Thermoplastics are expected to have good mechanical properties, as well as heat and chemical resistance, depending on the conditions in which they are located. Engineering thermoplastics are expected to be suitable for one or more high performance engineering applications. Additive manufacturing is becoming widespread as a production method in which parts with a complex geometry can be obtained very quickly and with less energy consumption. It provides a fast solution in prototype manufacturing and the production of parts that are not possible with conventional methods can be successfully manufactured with this method. The disadvantages of this manufacturing method are that the time that can be considered reasonable for prototype

manufacturing takes more time compared to mass production lines where large numbers of production are expected. Deficiencies in repeatability and process stability can also be counted as other disadvantages. On the other hand, although it is not a problem for some products, we see that additive production often cannot meet the expected surface roughness in some sensitive industrial applications. In areas where surface roughness is limited, an additional process is performed to obtain the desired delicate surfaces.

In the literature, 3D printed PLA and ABS samples; There are studies such as determination of optimization parameters [1], determination of structural properties by recycling [2], mechanical properties of graphene filaments [3], determination of tensile and bending behavior [4].

Water jet cutting, unlike other machining processes, is a production method that uses

water at high pressure and speed for the cutting process. The water jet processing method is used in a wide range from soft materials such as plastic to hard metals. While no abrasive is needed for soft materials when the water jet contacts the workpiece, abrasive particles are added for hard metals. Thus, the effect of cutting power is increased [5]. Among the important advantages of the water jet processing method are that it can be used in many areas regardless of the hardness of the material, as well as the fact that it does not create a heat-affected zone in the material structure by not creating high heat at the time of cutting due to the cooling effect of water. In addition, not using cutting tools provides an important economic advantage. It provides a reduction in labor costs in terms of keeping the cutting surface clean as a result of the cutting process and not requiring any additional processing. On the other hand, the size and surface tolerances obtained as a result of processing are at an acceptable level for many manufacturing, together with the fact that they do not create any waste harmful to the environment during processing.

The disadvantages of this method are the high initial setup costs, the necessity of using abrasives in the processing of hard metals, and the longer time compared to cutting using tools. For this reason, the number of production per unit time is lower than conventional methods [6]. In the processing of thick-walled materials, due to the decrease in the effect of water jet, sometimes there are situations where the cutting process cannot be performed with the desired precision throughout the thickness.

In the literature, in the field of abrasive water jet (AWJ), machinability of multi-directional CFRP laminates [7], hybrid composites [8], parameter optimization of aluminum/tungsten carbide composites [9], kerf width and surface quality definition of metal-composite materials [10], carbon fiber reinforced polymers There are studies such as fluid-structure interaction modeling of abrasive waterjet puncture [11] and experimental investigation and optimization of abrasive waterjet processing parameters for GFRP composites [12] using metaphor-free algorithms. There is no study in the existing

literature on the surface roughness to be obtained by processing 3D printed PLA and ABS materials with abrasive water jet.

In this study, cylindrical parts made of PLA and ABS printing material are processed with AWJ without any thermal effect [13]. It has been determined how different machining parameters affect the average surface roughness. Nonlinear regression analysis and logarithmic transformation were used for experimental data.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

The work piece material produced with open source 3D printing machine, the materials properties of ABS and PLA (Table 1). The diameter of the test sample is 28 mm and its height is 150 mm. (Figure 1).

Table 1. PLA and ABS filament materials properties

Item	Units	ABS	PLA
Density	kg/m ³	1.01	1.20-1.25
Melt Point	°C	220-260	190-220
Tensile Yield Strength	MPa	40.96	62.63
Elongation at Break	%	20.86	4.43
Flexural Strength	MPa	45.44	65.02
Flexural Modulus	MPa	1948.45	2504.4
Impact Strength	kJ/m ²	22.11	4.28

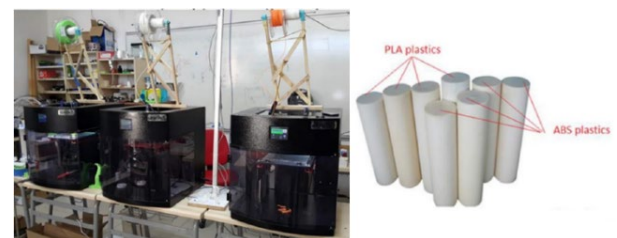


Figure 1. 3D printing machines used in the production of cylindrical parts

2.2. Experimental Layout

Experimental studies were carried out on a CNC abrasive water jet processing machine. This machine is max. It can produce a pump pressure of 415 MPa. The test sample was determined by calculating the arithmetic mean by making

several roughness measurements on the symmetry axis. A new turning mechanism was developed by removing the negativities in the water jet turning mechanisms available in the literature. While existing turning arrangements are made open air, loud noise and water abrasive particles are scattered around. In this study, by means of submerged working, on the one hand, it was possible to prevent water splashing during contact with the workpiece, and on the other hand, it was possible to reduce the noise level during machining. The structure of the specially developed underwater turning experimental setup, in which the defects that occurred in the previous studies were eliminated (Figure 2). During the processing with submerged abrasive water jet, sound level measurement is observed (Figure 3).

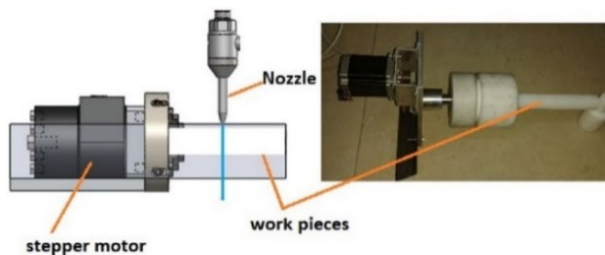


Figure 2. Technical design and fabricated views of the newly designed AWJ system.

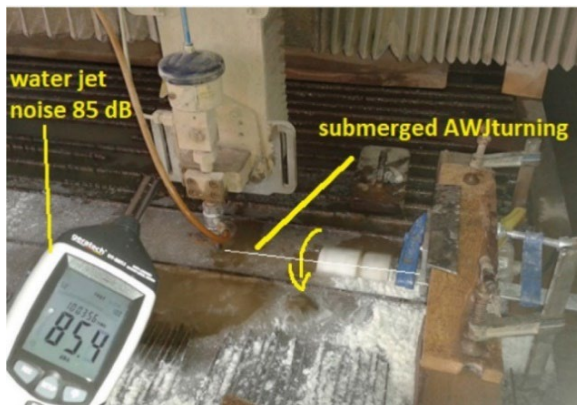


Figure 3. PLA and ABS cylindrical parts turning with submerged AWJ

2.3. Test Parameters and Measurement

The parameters were determined based on the experiences obtained from the preliminary experiments and literature survey [14-18] (Table 2). Experiments were carried out at 350 MPa pump pressure. Output parameters were measured with the Mitutoyo sj-201 surface

roughness measuring device in the same direction as the water jet.

Table 2. AWJ Processing levels and parameters

Parameters	Units	Levels
Nozzle feed rate (NFR)	mm/min	60 110 160 210
Abrasive flow rate (AFR)	g/min	160 185 210 235
Chuck Turning speed (CRS)	RPM	85 135 185 235
Nozzle distance (ND)	mm	3 5 7 9

3. RESULTS AND DISCUSSION

Graphs and estimation equations were obtained by making nonlinear regression analysis on average surface roughness values obtained from the surfaces of processed plastic parts. The correlation between surface roughness and spindle speed in AWJ machining of ABS and PLA materials can be seen in Figure 4 and Figure 5. The average surface roughness value (5.80 μm to 4.96 μm to 17%) decreased as the lathe speed increased for PLA plastic material. High turnover speed has resulted in good macro surface quality. Similarly, for ABS material, when the rotation speed is increased from 85 rpm to 235 rpm, the average surface roughness value decreases from 5.80 μm to 4.96 μm and decreases by 14%.

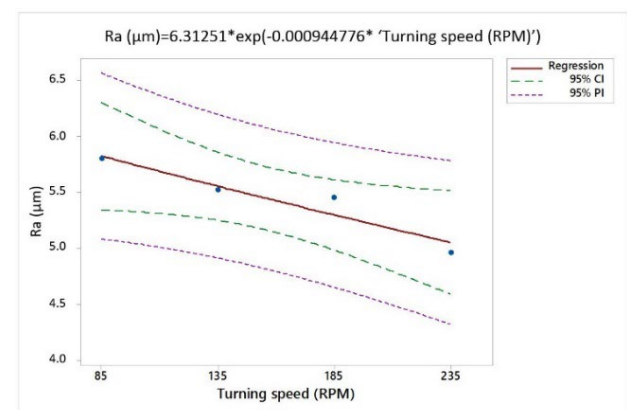


Figure 4. Influence of rotation speed on roughness when machining PLA material.

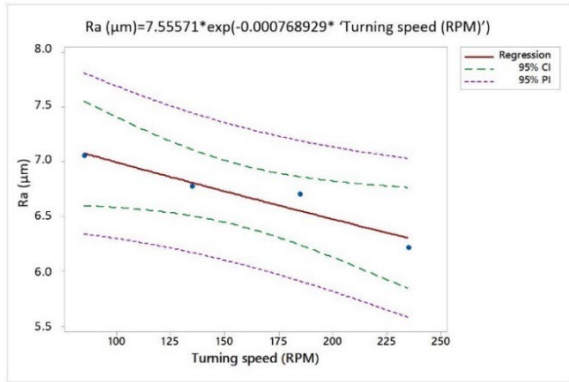


Figure 5. Influence of rotation speed on roughness when machining ABS material.

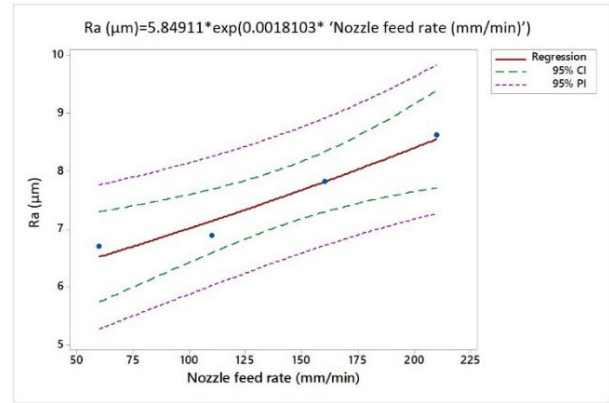


Figure 7. Influence of NRF on roughness when processing ABS material.

The Ra values obtained from experiments performed for ABS and PLA plastics using four different NRF's (Figure 6 and Figure 7). Ra increased by 26% (5.45 µm to 7.37 µm) when the NRF for PLA was increased from 60 mm/min to 210 mm/min. Ra increased 22% (6.70 µm to 8.62 µm) when the NRF for ABS was increased from 60 mm/min to 210 mm/min. The increase in roughness is due both to the heterogeneity of the jet's effect on the surface and to less processing time. The abrasive particles included in the water jet are not homogeneous in size. As the nozzle feed rate (NFR) increases, the number of particles contacting the surface of the treated material will be reduced. For this reason, the particles which are not homogeneous and have less contact with the surface will not be able to provide a homogenous plastic deformation. This causes deterioration of surface quality, the findings present a good fit with the literature [19-21].

The variation of the abrasive flow rate (AFR) in the AWJ turning method with the variation of the surface roughness values of PLA and ABS (Figure 8 and 9 Figure). AFR increased from 160 g/min to 235 g/min average 35% surface roughness on PLA (6.58 µm - 4.85 µm) and ABS (7.82 µm - 6.11 µm) provided improvement. The higher AFR improved the Ra values by providing a more stable cutting process. The increase in the AFR will allow more abrasive particles to be contacted on the surface per unit time. The surface quality of the treated material has increased since this situation provides homogenization at the particle contacting surface. In addition, the increase in the amount of particles in the water jet provides the more rigid behavior of the jet. As the speed increases with increasing speed, more stable cutting will be expected.

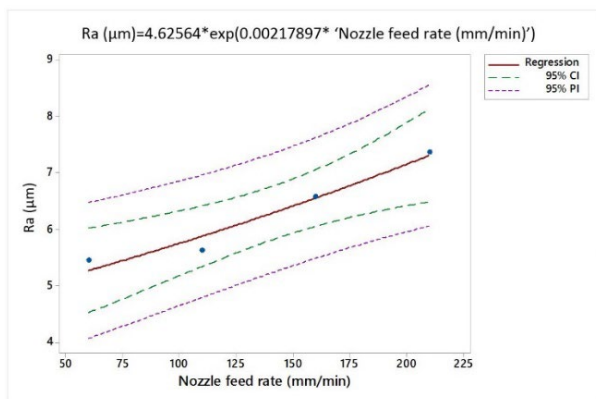


Figure 6. Influence of NRF on roughness when processing PLA material.

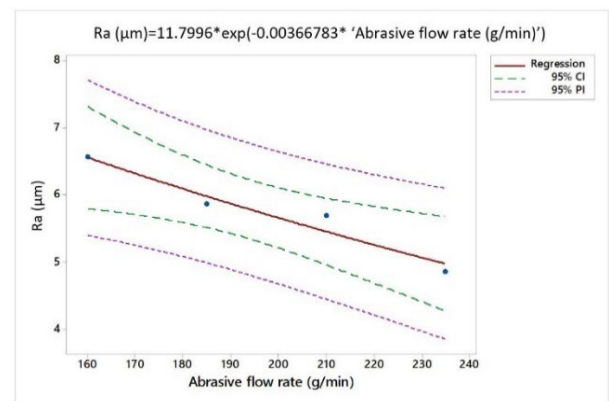


Figure 8. The effect of abrasive flow rate on the Ra when machining PLA material.

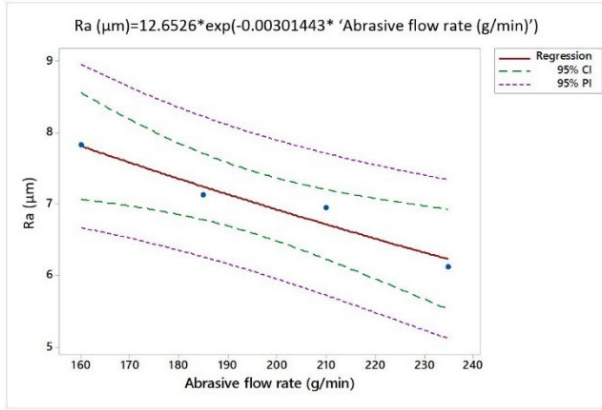


Figure 9. The effect of abrasive flow rate on the Ra when machining ABS material.

The Ra values obtained from experiments performed at four different nozzle distances (2, 4, 6 and 8 mm) for PLA and ABS plastics (Figure 10 and Figure 11). Increasing the ND parameter worsened the mean Ra value. This can be explained by the nature of the jet produced by the nozzle. Degradation of the jet core results in the formation of rougher surfaces due to a larger and inhomogeneous impact. When the nozzle distance (ND) from PLA plastic material was increased from 3 mm to 9 mm, the average surface roughness values increased by 19% (5.07 μm - 6.24 μm). When the distance between the material and the nozzle was increased from 3 mm to 9 mm during machining, the average surface roughness value increased by 19 %5.07 μm -6.24 μm for PLA material and 16% (6.17 μm -7.35 μm) for ABS material.

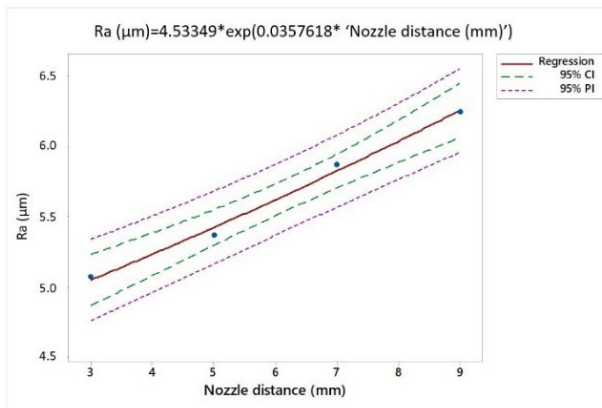


Figure 10. Surface roughness obtained in PLA material due to ND change.

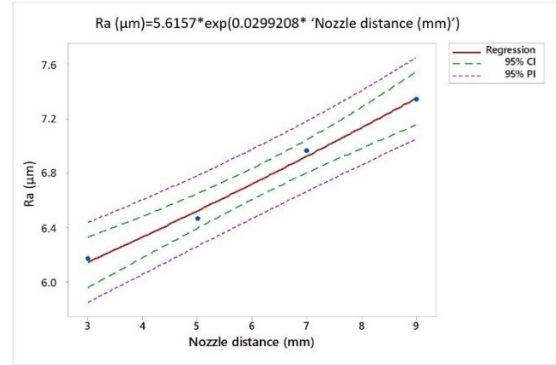


Figure 11. Surface roughness obtained in ABS material due to ND change.

The surface roughness values were statistically significant. The variation of the input parameter and the variation of the surface roughness values and the estimation interval vary in the 95% confidence interval. Furthermore, the fact that the values change with the low differences along the linear axis in the center of the figure proves that the experimental results have a high regression coefficient (relation rate). It can be argued that the variation of the surface roughness values with the change of each parameter can be modeled as nonlinear regression (obtaining empirical equations) in the mathematical modeling stage. The macro surface view obtained at the NFR 225 mm/min (Figure 12.a).

There are jet grooves and spiral cavities formed here. The cavities formed depending on the feed rate of the nozzle were obtained at 225 mm/min. This value can be said to be high for the processing of plastic materials. The Scanning Electron Microscope (SEM) image of the machined ABS and PLA plastic material work piece, (Figure 12.b), because of the lower density of PLA material, it is more easily processed than ABS material and jet lines are not visible in the area processed behind the nozzle. One reason for this may be related to the density and mechanical properties of the material. PLA is more easily broken and hard surface. It is more likely to break when bent. The 3D models produced by PLA can be cut, grinded, painted and bonded with strong adhesives. 3D models manufactured with ABS are stronger and more impact resistant. Therefore, it is recommended to use in mechanical parts and against variable weather

conditions. When plastic materials are tried to be processed with traditional methods, since heat is applied above the melting temperature (T_m) of plastics, it is not possible to process such materials because the material undergoes deformation. For this reason, plastic materials are produced by molding technique and used in industry with a limitation that does not allow processing. However, since the heat generated in the material during turning with water jet is transferred by means of water, high heat does not occur. Thus, it is possible to keep the plastic material below the glass transition temperature (T_g) value at which it will start to deform.

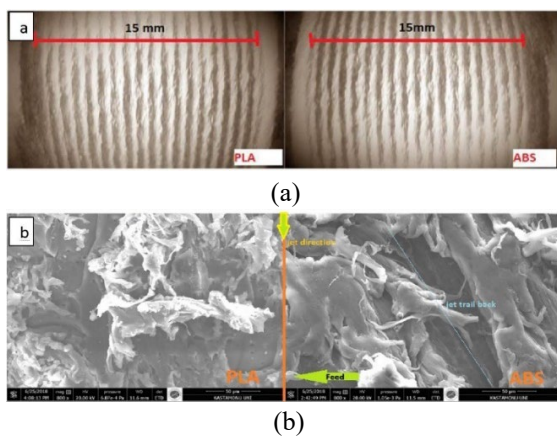


Figure 12. Machined ABS and PLA plastic parts

4. CONCLUSIONS

The machinability of ABS and PLA materials was investigated by turning with abrasive water jet. The input parameters considered are ND, AFR, NFR and CRS. The input parameters are determined as four levels and the surface roughness (output parameter- R_a) values are changed depending on the change of the levels. The following results were obtained from the studies carried out with the newly designed and developed experimental system.

The increase in flow rate (from 160 g/min to 235 g/min) and chuck speed (from 85 rpm to 235 rpm) resulted in a 35% and 26% decrease in the average surface roughness value, respectively. The increase in ND resulted in a 19% increase in the surface roughness value. Thus, it has been determined that the increase in flow rate and chuck speed improves the surface roughness, while the increase in ND worsens it. The most important problem in front of the processing of thermoplastics by removing

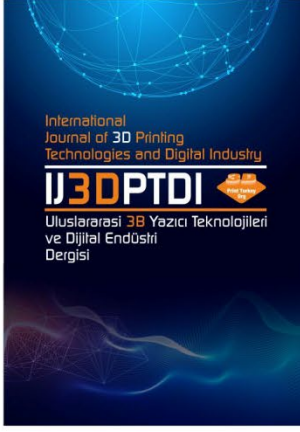
sawdust is the melting and deformation of the part due to the high heat generated during processing. It can be said that an effective solution has been presented by overcoming this problem with the abrasive water jet turning method. It has been determined that this method, which eliminates all the costs such as tool supply, coating and renewing them as they wear, is a very economical method during the manufacturing process.

But the three major disadvantages of the process should not be ignored. The first is the difficulty of loom installation and sealing problems. The second element is that it is difficult to obtain adequate and desired surface quality. For this reason, roughing process is more effective in turning with abrasive water jet. The minimum surface roughness value obtained in the processing of ABS and PLA material is $4.86 \mu\text{m}$. This value is high even for roughing. For this reason, considering the industry expectations, the abrasive water jet turning method is difficult to use as final processing. The third factor is ergonomic factors. Due to the excessive noise of the water jet machine, operators need protective equipment. In this study, submerged turning operation was also carried out successfully submerged, resulting in a lower noise level in the open atmosphere (85 dB). In order to remove the mentioned disadvantages, further research is needed on the subject of abrasive water jet and submerged turning.

REFERENCES

1. Abeykoon C, Sri-Amphorn P, Fernando A. "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 3, Issue 3, Pages 284-297, 2020.
2. Kumar R, Singh R, Farina I. "On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications". *PSU Research Review*, Vol. 2, Issue 2, Pages 115-137, 2018.
3. Camargo JC, Machado ÁR, Almeida EC, Silva EFMS. "Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 103, Issue 5, Pages 2423-2443, 2019.
4. Dhinesh SK, Arun PS, Senthil KK, Megalingam A. "Study on flexural and tensile behavior of PLA,

- ABS and PLA-ABS materials". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, Pages 1175-1180, 2021.
5. Momber AW, Kovacevic R. "Principles of abrasive water jet machining". Springer Science & Business Media, 2012.
 6. Kim K, Kim J. "BN-MWCNT/PPS core-shell structured composite for high thermal conductivity with electrical insulating via particle coating", *Int. J. Sci. Technol. Polymer*, Vol. 101, Pages 168-175, 2016.
 7. El-Hofy M, Helmy MO, Escobar-Palafox G, Kerrigan K, Scaife R, El-Hofy H. "Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates". *Procedia Cirp*, Vol. 68, Pages 535-540, 2018.
 8. Garikipati P, Balamurugan K. "Abrasive water jet machining studies on AlSi 7+ 63% SiC hybrid composite". In *Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing*, Springer, Singapore, Pages 743-751, 2021.
 9. Kumar KR, Sreebalaji VS, Pridhar T. "Characterization and optimization of abrasive water jet machining parameters of aluminium/tungsten carbide composites". *Measurement*, Vol. 117, Pages 57-66, 2018.
 10. Pahuja R, Ramulu M, Hashish M. "Surface quality and kerf width prediction in abrasive water jet machining of metal-composite stacks". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 175, Pages 107-134, 2019.
 11. Nyaboro JN, Ahmed MA, El-Hofy H, El-Hofy M. "Fluid-structure interaction modeling of the abrasive waterjet drilling of carbon fiber reinforced polymers". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 58, Pages 551-562, 2020.
 12. Tripathi DR, Vachhani KH, Bandhu D, Kumari S, Kumar VR, Abhishek K. "Experimental investigation and optimization of abrasive waterjet machining parameters for GFRP composites using metaphor-less algorithms". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 36, Issue 7, Pages 803-813, 2021.
 13. Hocheng H. "Machining technology for composite materials: principles and practice", Elsevier, 2011.
 14. Srivastava AK, Nag A, Dixit AR, Scucka J, Hloch S, Klichová D, Tiwari S. "Hardness measurement of surfaces on hybrid metal matrix composite created by turning using an abrasive water jet and WED", *IMEKO, Measurement*, Vol. 131, Pages 628-639, 2019.
 15. Nag A, Ščučka J, Hlavacek P, Klichová D, Srivastava AK, Hloch S, Zelenak M. "Hybrid aluminium matrix composite AWJ turning using olivine and Barton garnet". *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 94, Issue 5-8, Pages 2293-2300, 2018.
 16. Hutyrová Z, Ščučka J, Hloch S, Hlaváček P, Zelenák M. "Turning of wood plastic composites by water jet and abrasive water jet". *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 84, Issue 5-8, Pages 1615-1623, 2016.
 17. Kartal F. "A review of the current state of abrasive water-jet turning machining method". *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 88, Issue 1-4, Pages 495-505, 2017.
 18. Hashish M. "A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets". *J. Eng. Mater. Technol*, Pages 88-100, 1984.
 19. Hashish M. "Turning with abrasive water jets; a first investigation". *J. Eng. Ind*, Pages 281-290, 1987.
 20. Hu D, Tang CL, Kang Y, Li X. "An investigation on cutting quality by adding polymer in abrasive water jet". *Particulate Sci. Technol*, Vol. 34, Issue 3, Pages 352-358, 2016.
 21. Kartal F, Çetin MH, Gökkaya H, Yerlikaya Z. "Optimization of abrasive water jet turning parameters for machining of low density polyethylene material based on experimental design method". *Int. Polymer Processing*, Vol. 29, Issue 4, Pages 535-544, 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>

INTERNET OF THINGS BOTNET DETECTION VIA ENSEMBLE DEEP NEURAL NETWORKS

Yazarlar (Authors): Yağız Onur KOLCU^{ID*}, Ahmet Haşim YURTTAKAL^{ID}, Berker BAYDAN^{ID}




Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kolcu Y.O., Yurttakal A.H., Baydan B., "Internet Of Things Botnet Detection Via Ensemble Deep Neural Networks" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 191-197, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1293277

Araştırma Makale/ Research Article

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

INTERNET OF THINGS BOTNET DETECTION VIA ENSEMBLE DEEP NEURAL NETWORKS

Yağız Onur KOLCU^a, Ahmet Haşim YURTTAKAL^b, Berker BAYDAN^c

^aAfyon Kocatepe University, Institute of Science and Technology, TÜRKİYE

^bAfyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, TÜRKİYE

^cHAVELSAN, Ankara, TÜRKİYE

* Corresponding Author: y.onurkolcu@gmail.com

(Received: 06.05.23; Revised: 21.06.23; Accepted: 10.07.23)

ABSTRACT

The widespread use of the Internet of Things (IoT) and the rapid increase in the number of devices connected to the network bring both benefits and many problems. The most important of these problems is cyber attacks. These cyber attacks cause financial losses as well as loss of reputation and time. Intrusion detection systems (IDS) and intrusion prevention systems (IPS) are used to eliminate or minimize these losses. IDS are designed to be signature-based or anomaly-based, and are currently being developed using anomaly-based systems as machine learning methods. The aim of this study is to detect whether there is an attack on your network, with a high success rate, by considering botnet as one of the attack types. In order to develop this system, it is aimed to use Ensemble Deep Neural Networks (DNN), which is one of the machine learning methods, and to search for solution methods for the most accurate result. In the study, N-BaIoT dataset in the UCI Machine Learning library was used for scientific research. The data consists of 1 benign network stream and 9 malicious network streams carried by 2 botnets. Stacked ensemble of DNN networks has been used from the classification stage. The proposed method has achieved %99 accuracy and the results are encouraging for future studies.

Keywords: Botnet, Internet of Things, Ensemble, Deep Neural Network, Cyber Threats.

1. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) is the interconnection of physical devices and objects through networking [1]. The most important benefit is that it provides remote sensing and control of objects. It also provides economy and efficiency by minimizing human intervention. IoT consists of internet-connected devices such as smart home appliances, water meters, security cameras. These devices are small computers with processor and IP address running on Linux devices [2]. While there are at least 10 billion active IoT devices in 2021, it is predicted that this number will exceed 25.4 billion in 2030 [3].

IoT devices generate, process and exchange significant amounts of data during their operations. IoT devices are prone to a variety of physical, network, and application layer attacks that can lead to business disruptions, privacy breaches, and even physical injury. Therefore,

security requirements come to the same level of priority as product innovation [4]. Network security, which is the biggest problem of our age, is now a big problem not only for computers, but also for every device connected to the internet. Millions of new devices are connecting to the internet every day. However, this great development brings with it great risks. Every day, cyber crimes are spreading rapidly and cybercriminals are carrying out various attacks [5]. For this reason, increasing the performance of intrusion detection systems is among the most important goals of information technologies [6]. Botnets are one of the threats that can most exploit IoT vulnerabilities [7]. A botnet is a collection of devices connected to the internet and infected with malware. These bots can be used for denial of service and various spam attacks [8]. Also, bots goal to distribute false information from illegal sources, to obtaine identity, password and financial data and to processe data to crack the password for

access to additional hosts [9]. Therefore, the detection and elimination of botnets are significant cybersecurity challenges. Reliable and inexpensive Botnet detection models are essential to detect and warn of risks without corrupting transmission data [10]. Detection of botnets is different from malware detection systems or anomaly detection systems. Because while other attacks represent an individual pattern, botnet attacks are part of a large attack network [11].

Artificial intelligence and machine learning algorithms learn complex patterns on data that cannot be noticed by the human eye, and provide fast, accurate, human-independent results [12]. Artificial intelligence and machine learning have achieved successful results in health [13-14], agriculture [15] and safety [16-17]. With the developments in hardware and processing capacity technology in recent years, machine learning and artificial intelligence algorithms make network security studies more successful [18]. Stevanovic and Pedersen (2016) emphasized supervised learning methods such as artificial neural networks and unsupervised learning methods such as hierarchical clustering in their botnet identifying studies [19]. Verma and Ranga (2020) found that ensemble methods are successful for detecting Denial of Service (DoS) attacks in IoT networks [20]. Altunay and Albayrak (2021) implemented an attack detection application based on feature selection using a Convolutional Neural Networks (CNN) to prevent cyber attacks. The success of detecting data as a threat was 98.7% for Brute Force, 98.5% for DoS, 98.9% for Botnet and 99.1% for SQL Injection [21].

In this study, the detection of botnet attacks on IoT devices is classified with Ensemble Deep Neural Network. The network traffics of 10 different IoT devices, including 1 benign and 9 malignant, belonging to 2 botnet attacks, were classified with 99% accuracy. The proposed method is fast, secure and automatic with high accuracy.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Dataset

The dataset used in the study, N-BaIoT, created by Meidan et al.[22], is a general dataset used to detect botnet attacks on IoT devices with open access for academic studies. Network traffic

belongs to 10 IoT devices, 9 attack classes and 1 benign, carried by 2 botnets. IoTs consist of a thermostat, a baby monitor, a webcam, two different doorbells, and four different inexpensive security cameras. Devices that were Danmini (Doorbell), Ecobee (Thermostat), Ennio (Doorbell), Philips_B120N10 (Baby_Monitor), Provision_PT_737E (Security_Camera), Provision_PT_838 (Security_Camera), Samsung_SNH_1011_N (Webcam), SimpleHome_XCS7_1002_WHT (Security_Camera), SimpleHome_XCS7_1003_WHT (Security_Camera), were malignant. This private network was created by infecting one of the security cameras with a real sample of Mirai botnet malware [23]. The traffic information of the dataset is given in Table 1.

Table 1. Traffic Information [24]

ID	Name	Device	
		Type	Traffic
		All	
0	benign	Devices	555932
1	Danmini	Door bell	968750
		Thermost	
2	Ecobee	at	822763
3	Ennio	Door bell	316400
		Baby	
4	Philips_B120N10	Monitor	923437
	Provision_PT_737	Security	
5	E	camera	766106
		Security	
6	Provision_PT_838	camera	738377
	Samsung_SNH_10		
7	11_N	Webcam	323072
	SimpleHome_XC	Security	
8	S7_1002_WHT	camera	816471
	SimpleHome_XC	Security	
9	S7_1003_WHT	camera	831298

Mirai is malware that mostly targets networked smart home and consumer devices and can turn them into a zombie network of remote bots [25]. The largest distributed denial of service (DDoS) attack in 2016 was carried out by the Mirai botnet. Mirai botnet detection is important when it is predicted that the number of devices using IoT will gradually increase [26]. The main features based on the classification are information that summarizes the flow traffic, information that summarizes the jitter of the traffic, time frame information, the number of items that have appeared recently, and the

variances of the two flows. While the dataset consists of 165645 samples, the number of features that are the basis for classification is 115.

2.2. Ensemble Deep Neural Network

Machine learning is a useful artificial intelligence technique that automatically finds useful information from large datasets. Deep learning is a branch of machine learning [27]. Since there are many security areas, machine learning is important for this area. Bots generate different flows than normal flows. In this way, machine learning (ensemble classifier algorithms) can classify flows with the highest accuracy [10]. It seems more rational to use machine learning to detect botnet [28]. Deep neural networks (DNN) learn the parameters that provide the best approximation by mapping the convergence of a function f with input I to the value O . The information flows through the calculated function starting from I , passes through the f function with intermediate calculations and reaches the output value of O . The output of the model has no feedback links fed into it. Model $f(I)=f_3(f_2(f_1(I)))$ can consist of functions linked like a chain. In this case, f_1 constitutes the first layer of the network and f_2 constitutes the second layer of the network. The length of the entire chain gives the depth of the pattern. This is where the concept of depth in a deep neural network comes from. The layers between the input and output layers of the neural network are hidden layers. The dimensions of the hidden layers give the width of the model. The last layer of the deep neural network gives the output layer [29].

Ensemble learning is learning that allows building the model with more than one learner. It aims that the models will make more accurate decisions in solving the problem. There are different ensemble learning techniques such as Boosting, Bagging, Stacking, Voting. Stacking ensemble was used in the study [30]. Stacking involves training a different classifier by combining the predictions of several classifiers. In the first stage, the existing data is trained with classifiers. It is then trained with a final meta-learner algorithm, using the predictions of the first-stage algorithms as additional inputs [31].

3. EXPERIMENTAL RESULTS

All codes of the study were developed in open source Python environment. 70% of the dataset is split for training and 30% for testing. The

proposed ensemble model was developed on the basis of the model that was successful in diabetes detection before [32]. In the first stage, output prediction values were taken from 2 DNN models. The neuron numbers of the model used at this stage are 128-64-32-10. While the activation function of the intermediate layers is ReLu, the activation function of the output layer is Softmax. Activation function is necessary for his model structure because this neural network is need to learn nonlinear situation as well. If the activation function is not used, the output signal becomes a simple linear function. Linear functions are only polynomials of odd degree. A neural network without activation function will act like a linear regression with limited learning power. In the DNN structure used in the Meta Learner stage, two layers, 32-10, were used. While the number of learnable parameters of the models used in the first stage is 25514, the total number of learnable parameters of the whole model is 52030. The architectural structure of the proposed model is given in Figure 1.

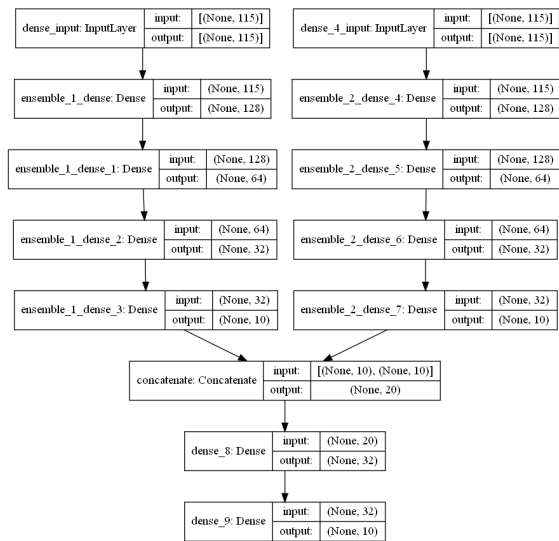


Figure 1. Proposed Model.

While the networks in the first layer were run 500 epochs, Stacked Ensemble model 300 epochs were run. Adam Optimizer was used as the optimizer. Adam Optimizer was preferred because it gave more successful results. Other hyperparameters are given in Table 2.

Table 2. Hyperparameters

Parameters	Value
Learning Rate	0.001
Beta 1	0.9

Beta 2	0.999
Epsilon	1e-07

2	1.00	1.00	1.00	4083
3	0.99	0.93	0.96	4380
4	0.92	1.00	0.96	4680
5	1.00	1.00	1.00	7963
6	1.00	0.98	0.99	1972
7	1.00	1.00	1.00	9130
8	1.00	1.00	1.00	4625
9	1.00	1.00	1.00	6971

The loss function is the categorical cross entropy. Because our problem to be classified is multiclass. Figure 2 shows the accuracy epoch graph for the training process.

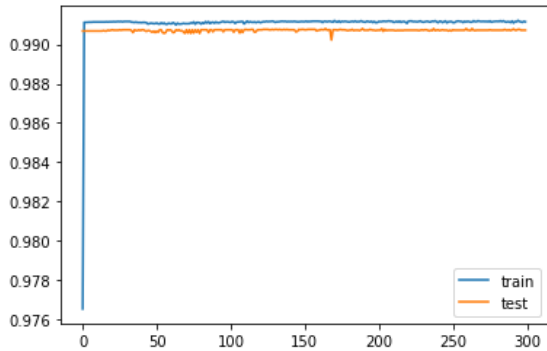


Figure 2. Accuracy- Epoch Graph.

According to the figure, the training processes of the training and test groups are compatible with each other. This shows that there is no over-fitting in the training of the model and that the proposed model has a high generalization capacity. In Figure 3, the confusion matrix of the test set is given.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1382	0	0	2	43	0	0	0	0	0
1	0	4449	0	0	13	0	0	0	1	0
2	0	0	4066	1	13	0	0	0	1	0
3	0	0	0	4092	288	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	4680	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	20	7943	0	0	0	0
6	0	0	0	31	13	0	1928	0	0	0
7	0	0	0	0	7	0	0	9123	0	0
8	0	0	0	1	14	1	0	0	4609	0
9	0	0	0	0	10	0	0	0	0	6961
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figure 3. Test set confusion matrix.

According to the figure, most of the samples were estimated correctly. Accuracy, precision, recall, F1 score performance metrics are 0.99, 0.991, 0.986, 0.988, respectively. Performance metric values calculated separately for each class are given in Table 3.

Table 3. Performance Metrics.

Clas s	Precisio n	Reca ll	F1- Score	Number of Samples
0	1.00	0.97	0.98	1427
1	1.00	1.00	1.00	4463

According to the results obtained, the lowest 0.96 F1 score was obtained in the malignant network traffic of the doorbell coded as 3 and the baby monitor coded as 4. Figure 4 shows the ROC curve for each label. The results show that the AUC value for each label is close to 100%.

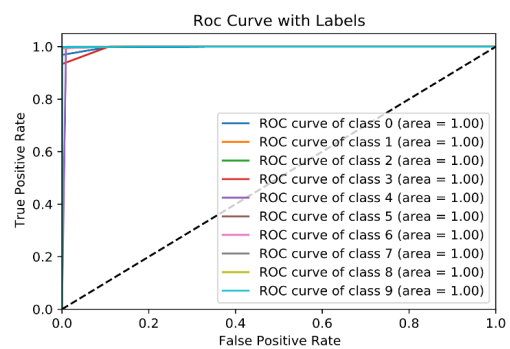


Figure 4. ROC Curve.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

In the era of digital transformation, IoT is undoubtedly one of the leading technologies that revolutionize the lives of both institutions and individuals. IoT is the communication of physical devices that have an IP address, connect to the internet and share data with each other. Although this technology is the key point of the industrial revolution, it is also frequently used in smart home, smart agriculture and smart health applications. IoT devices communicating with each other can pose a security threat to networks. Even a seemingly simple device can pose serious dangers when compromised by attackers. For example, a baby camera captured by a hacker can be used for spying. Attackers can disrupt network services, steal data, cause physical harm or even harm people. Botnet is one of the biggest threats to IoT devices. For this reason, many studies have been conducted on artificial intelligence-based botnet detection. Botnet is one of the biggest threats to IoT devices. For this reason, many studies have been conducted on artificial intelligence-based botnet detection. Ahmetoğlu and Daş (2019) tried to detect benign, FTP patator, SSH-

patator, DoS, Heartbleed, Brute Force, Web Attack–SQL Injection, DDOS, Port attack, Botnet attack types with a fully connected artificial neural network [6]. Wai et al. (2018) proposed a botnet traffic detection technique based on machine learning. Their research relies on multi-layer perceptrons and decision trees to analyze network traffic for automatic traffic detection [33]. It can be seen that deep learning methods are effective in creating behavioral analysis of the large amount of data created in the IoT network. It has been determined that deep learning mechanisms outperform other contingency solutions in multiple domains using unstructured and heterogeneous data.

The problem with traditional machine learning algorithms is that while they can run well in a self-created environment, data increases as more devices are included in the network, giving these models a display of wear. Since deep learning algorithms learn more from more data, there are studies in this area where deep learning solves this problem. In addition, the state of art algorithms which are decision tree and artificial neural networks, are used for botnet detection. Regarding to comparison of these algorithms, CTU-13 that contained network traffic dataset, was used in this study. Neural network and decision tree have accuracies 0.91 and 0.98, respectively. Our proposed solution's F1 score which is 0.99, is more accurate than these two algorithms [26]. In another study, Cyber Clean Center dataset which contains traffic packets 6667 as port number used for IRC and 80 as port number http. According to comparison of F1-score of botnet detection, our proposed algorithm is better than ELM (91.6%), CNN(92.56%), SVM(93.36%) and Ensemble Classifier Algorithm with Stacking Process (ECASP) (94.08%) [34]. In Meidan and friends' IoT botnet detection, deep autoencoders was used in their proposed method. The detection of IoT botnet attacks N-BaIoT dataset was used in this study. Mirai and Bashlite which are most popular IoT based botnets, were infected for each device. Meidan and friends' model structure were occurred by four hidden layers of encoders which decreasing sizes of 75%, 50%, 33% and 25% of the input layer's dimension. The other next layers contained decoders via similar size as encoders. This structure of their model's true positive rate is 100% similar with our proposed solution of true positive rate. Local Outlier Factor (LOF), One-Class SVM,

and Isolation Forest were also other evaluated algorithms in Meidan and friends' study. Their proposed solution of TPR is similar with LOF and SVM and more accurate than Isolation Forest [22].

In another study Algelal and friends' botnet detection methods was trained and tested with CTU-13 dataset and 10 fold cross validation. The accuracy of proposed model is 99.84%. Ensemble classifiers in this study consist of AdaBoost and Jrip algorithms. IoT botnet detection via ensemble deep neural networks has almost similar accuracy with AdaBoost and Jrip algorithms. The rest of method which are Clustering (98.39%), Neural Network (89.38%), Recurrent Neural Network (83.09%), K-medoids, L-means, LSTM, decision trees, has less accuracy detection than proposed model for botnet detection [10]. The another study which was used ISCX dataset, analyzed botnet traffic with Ensemble of classifier algorithm. This dataset contained normal traffic and botnet traffic. This study also showed that ensemble classifier algorithms which were Ada-Boost with Decision Tree (94.78%) and Soft Voting of KNN & Decision Tree (96.41%), increased the accuracy of botnet detection as our proposed model's accuracy [35]. Recently, real time automatic botnet detection tool was developed for large network bandwidths. Since the duration botnet detection was really important, they developed ultra fast network analysis tool by using their proposed new machine learning model. Although their processing time was very fast (0.007 ms), their F1 score was less (0.926) than F1 score of our proposed model [36]. In another recent study was related with economic system to detect IoT botnets with deep learning model. Their proposed model asserted that decrease the implementation budget and supplied used efficient low cost development structure for their model. However, the F1 score was really low, especially test class 2 (0.41), class 3 (0.77) and class 5 (0) [37].

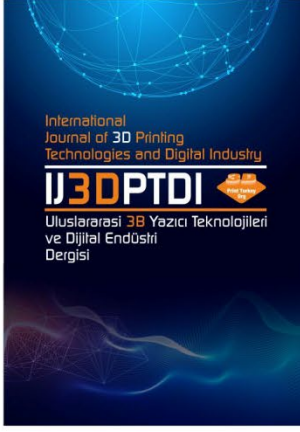
In this study, the network traffic of 10 devices, 9 malignant and 1 benign, belonging to the N-BaIoT dataset was classified with an Ensemble DNN-based approach. According to the results obtained, the proposed method works with 99% accuracy. The problem, which is a complex and multi-classification problem due to its structure, works quickly, independently of the user, and with high accuracy thanks to the proposed

method. It resolves concerns by providing solutions to individual and corporate security problems. The results are promising and encouraging for future studies.

REFERENCES

1. Elkhodr, M., Shahrestani S. and Cheung, H. "The Internet of Things: Vision & Challenges", IEEE 2013 Tencon-Spring, Pages 218-222, Sydney, 2013.
2. Barrera, D., Molloy, I. and Huang, H. "IDIoT: Securing the Internet of Things like it's 1994," arXiv preprint arXiv:1712.03623, 2017.
3. Huyghue, B.D. "Cybersecurity, Internet of Things, and Risk Management for Businesses", Diss. Utica College, Utica, NY, 2021.
4. Skorin-Kapov, N. et al. "Physical-Layer Security in Evolving Optical Networks." IEEE Communications Magazine, Vol. 54, Issue 8, Pages 110-117, 2016.
5. Gantz J. and David, R. "The digital universe in 2020: Big Data, Bigger Digital Shadows and Biggest Growth in the Far East." IDC iView: IDC Analyze the future 2007, Pages 1-16, 2012
6. Ahmetoğlu, H. and Daş, R., "Derin Öğrenme ile Büyük Veri Kumelerinden Saldırı Türlerinin Sınıflandırılması", IDAP, Pages 455-463, Malatya, Türkiye, 2019.
7. Bezerra, V.H. et al, "IoTDS: A One-Class Classification Approach To Detect Botnets in Internet of Things Devices." Sensors, Vol. 19, Issue 14, 2019.
8. Bertino E. and Islam, N. "Botnets and Internet of Things Security." Computer, Vol. 50, Issue 2, Pages 76-79, February 2017.
9. Grizzard J.B. et al, "Peer-to-Peer Botnets: Overview and Case Study," HotBots, Vol. 7, Pages 1-8, 2007,
10. Algelal, Z. et al, "Botnet Detection Using Ensemble Classifiers of Network Flow", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 10, Issue 3, Pages 25-43, 2020.
11. Geer, D., "Malicious Bots Threaten Network Security." Computer, Vol. 38, Issue 1, Pages 18-20, January 2005.
12. El Naqa, I. and Murphy, M. J. "What is Machine Learning?" Machine Learning in Radiation Oncology, Pages 3-11, Springer, Cham, 2015.
13. Yurttakal, A. H., & Erbay, H. "Segmentation of Larynx histopathology images via convolutional neural networks" In Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions: Proceedings of the INFUS 2020 Conference, Istanbul, Turkey, July 21-23, Pages 949-954. Springer International Publishing, 2021.
14. Çınarar, G., Emiroğlu, B. G., & Yurttakal, A. H. "Predicting 1p/19q chromosomal deletion of brain tumors using machine learning" Emerging Materials Research, Vol. 10, Issue 2, Pages 238-244, 2021
15. Yurttakal, A. H. "Extreme gradient boosting regression model for soil thermal conductivity" Thermal Science, Vol. 25, Issue 1, Pages 1-7, 2021
16. Arslan, R. S., & Yurttakal, A. H. "K-nearest neighbour classifier usage for permission based malware detection in android". Icontech International Journal, Vol. 4, Issue 2, Pages 15-27, 2020.
17. Horasan, F., & Yurttakal, A. H. Darknet Web Traffic Classification via Gradient Boosting Algorithm. International Journal of Engineering Research and Development, Vol. 14, Issue 2, Pages 794-798, 2022.
18. Lu, Y., "Artificial Intelligence: A Survey on Evolution, Models, Applications and Future Trends", Journal of Management Analytics, Vol. 6, Issue 1, Pages 1-29, 2019.
19. Stevanovic M. and Pedersen, J.M. "On the Use of Machine Learning for Identifying Botnet Network Traffic." Journal of Cyber Security and Mobility, Vol. 4, Issue 2 & 3, Pages 109-128, 2016.
20. Verma, A. and Ranga, V., "Machine learning Based Intrusion Detection Systems for IoT Applications", Wireless Personal Communications, Vol. 111, Issue 4, Pages 2287-2310, 2020.
21. Altunay, H. C. and Albayrak, Z., "Network Intrusion Detection Approach Based on Convolutional Neural Network." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Vol. 26, Pages 22-29, 2021.
22. Meidan, Y. et al. "N-Baiot—Network-Based Detection of IoT Botnet Attacks Using Deep Autoencoders." IEEE Pervasive Computing, Vol. 17, Issue 3, Pages 12-22, 2018.
23. Mirsky, Y. et al, "Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection." arXiv preprint arXiv:1802.09089, 2018.

24. Rey, V., Sánchez, P. M. S., Celdrán, A. H., & Bovet, G. "Federated learning for malware detection in iot devices". *Computer Networks*, Vol. 204, 2022.
25. Antonakakis, M., et al. "Understanding The Mirai Botnet." 26th USENIX Security Symposium, Pages 1093-1110, Berkeley, CA, USA, 2017.
26. Ryu, S. and Yang, B., "A Comparative Study of Machine Learning Algorithms and Their Ensembles for Botnet Detection," *Journal of Computer and Communications*, Vol. 6, Pages 119-129, 2018.
27. Liu, H., & Lang, B. "Machine learning and deep learning methods for intrusion detection systems: A survey". *Applied Sciences*, Vol. 9, Issue 20, 2019.
28. Rezai, A. "Using Ensemble Learning Technique for Detecting Botnet on IoT," *SN Computer Science*, Vol. 2, Issue 2, Pages 148, 2021.
29. Goodfellow, I. Yoshua B. and Aaron, C. "Deep learning", MIT Press, Cambridge, MA, 2016.
30. Rokach, L. "Ensemble-based classifiers." *Artificial Intelligence Review*, Vol. 33, Issue 1, Pages 1-39, 2010.
31. Wolpert, D. H. "Stacked Generalization." *Neural Networks*, Vol. 5, Issue 2, Pages 241-259, 1992.
32. Yurttakal A.H. and Baş, H. "Possibility Prediction of Diabetes Mellitus at Early Stage Via Stacked Ensemble Deep Neural Network." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 21, Issue 4, Pages 812-819, 2021.
33. Wai, F.K. et al, "Automated Botnet Traffic Detection Via Machine Learning.", *TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference*, Pages 38-43, Jeju Island, Korea, 2018.
34. Srinivasan S. and Kumar, D. "Enhancing the Security in Cyber-World by Detecting the Botnets Using Ensemble Classification Based Machine Learning", *Measurement: Sensors*, Vol. 25, Pages 2023.
35. Bijalwan, A. et al, "Botnet Analysis Using Ensemble Classifier" *Perspectives in Science*, Vol. 8, Pages 502-504, 2016.
36. Velasco-Mata, J., González-Castro, V., Fidalgo, E. et al., "Real-time botnet detection on large network bandwidths using machine learning" *Sci Rep*, Vol. 13, Pages 4282, 2023.
37. Elsayed N. et al., "IoT botnet detection using an economic deep learning model" *AIIoT*, 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>

2D LATTICE GENERATION BY COMPUTATIONAL DESIGN METHOD

Yazarlar (Authors): Nurullah Yüksel , Hüseyin Rıza Börklü 



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yüksel N., Börklü H.R., "2D Lattice Generation By Computational Design Method" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 198-203, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1239524

Araştırma Makale/ Research Article

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

2D LATTICE GENERATION BY COMPUTATIONAL DESIGN METHOD

Nurullah Yüksel^a , Hüseyin Rıza Börklü^a 

^aGazi University, Technology Faculty, Industrial Design Engineering Department, TURKEY

* Corresponding Author: nurullahyüksel@gazi.edu.tr

(Received: 19.01.23: Revised: 30.03.23: Accepted: 21.08.23)

ABSTRACT

Designers often face the challenge of getting stuck with rigid and dogmatic ideas, leading to a limited number of design options being produced. While experience and talent can help overcome this, it can still take a significant amount of time and effort. This study proposes a repeatable, dynamic process that transforms all design components into parameters, creates a structural analysis model, and performs an optimization process that integrates design and structural analysis. Thus, by leveraging the power of technology, designers can generate a larger number of high-quality design options quickly and efficiently. The article evaluates the effectiveness of this proposed method in generating 2D lattice design concepts and highlights its ability to improve the quality of the design options generated and simplify the idea and concept generation process. The novelty of this method lies in its ability to create a flexible and dynamic approach to design, enabling designers to move beyond dogmatic ideas and generate a larger number of innovative design options. Another purpose of this article is to explore the potential of computer-aided computational design software in generating new and innovative design concepts.

Keywords: Computational design, Generative design, Design Optimization, Lattice structures.

1. INTRODUCTION

The creation of a parametric design model through the combination of mathematically expressed design elements in an algorithm has become commonplace in engineering works that require structural performance and low weight [1-2]. These models offer advantages such as automation, speed, and increased variety in geometry. These features of parametric design have special importance in the design of lattice structures. Because of their lightness and strength, lattice structures made of truss or cellular structures are a popular design element in architecture, construction, and mechanical design [3].

Recent advancements in Additive Manufacturing (AM) have provided a new avenue for designing and producing lattice geometry. AM enables the fabrication of structures with micro-dimensions and areas that cannot be produced using traditional manufacturing methods, resulting in structures with superior mechanical properties such as

strength, stiffness, and energy absorption [4-5]. Additionally, AM methods offer a wide working field for parametric design, allowing for a high strength-to-volume ratio and an ideal geometry by changing the material distribution in the entire volume [6-7].

The optimization of geometry and shape using parametric, computational, and generative design methods has become a popular area of study. These methods provide an autonomous structural analysis tool in the early design process, allowing for the generation of good/optimal design alternatives quickly and economically [7]. Moreover, it enables the determination of the design option that meets the design and engineering needs while requiring the least revision.

Several studies have explored the application of parametric and computational design methods in different design fields [3]. In architecture, these methods have been used to optimize building shapes for energy efficiency, to create

lightweight structures with high structural performance, and to generate form variations with similar functions [8-9]. In machine design, these methods have been used to optimize the design of mechanical components for better performance and reduced weight [10]. Additionally, several studies have examined the use of parametric and generative design methods in the design of lattice structures, focusing on improving their mechanical properties and thermal conductivity [11]. In conclusion, the integration of parametric and computational design methods has become an essential tool in all design fields and activities, providing advantages such as automation, speed, and increased variety in form and geometry. The use of these methods, combined with advancements in AM, has opened up new possibilities in designing lattice geometry with superior mechanical properties. The application of these methods in various design fields has shown promising results and is expected to continue to develop in the future.

2. BACKGROUND

2.1. Computational Design

Computational design involves incorporating design parameters into a design algorithm with advanced computer technology. Computer software creates and evaluates design options with some mathematical operations. Computational design algorithms; create a dynamic, repeatable, and sustainable process. Different from the traditional design process, the use of time and resources is optimal here, as the designer is independent of his knowledge and intuition. Computational design tools break down the overall design structure into meaningful subunits and processes. The input-output relations between these subunits are made with visual programming.

With an interest in computational design, different techniques have been developed over time. Some of these are parametric and generative design concepts/techniques that are often used interchangeably. Although they do not have clear boundaries, they have important differences. First, the parametric design creates an interactive process by establishing semantic relationships between the elements (size, angle, volume, position, etc.) that make up the building. A change to a parameter causes other associated parameters to change automatically. Parametric models enable alternative design

exploration with real-time editing capability. On the other hand, generative design is an iterative design technique that can create an infinite number of alternatives with the help of artificial intelligence and cloud technologies according to predetermined design goals. Here, unlike parametric design, design evaluation criteria (weight, amount of material used, manufacturability, strength) are also included in the generative design algorithm. The ideal design is reached by making changes to the design parameters by trial and error. Thus, the design geometry is determined according to the current production method, and it is optimized in terms of strength and material used.

2.2. Design Optimization

Firms/manufacturers try to make economical production that saves material and cost to maintain market competition. In addition, it is aimed that the products produced are robust and long-lasting [12]. All these requirements have caused shape, size, and topology optimization problems in engineering design [13]. Size optimization adjusts material cross-sections and thicknesses to create designs with better performance. Shape optimization, another type of optimization, makes partial changes to the outer geometry of the part. Topology optimization, however, tries to provide the intended physical strength by using the least material under certain load and volume limitations [14-15].

In engineering design, some optimization and artificial intelligence techniques (evolutionary algorithms, swarm intelligence, artificial neural networks, machine learning, etc.) are used for ideal sizing, reshaping, weight, and cost reduction. These techniques have also been used to develop optimum truss and lattice structures. Raina et al. used a deep learning-based design support system for a lattice design problem in one of these studies. This system aimed to create an ideal lattice structure by following the mental processes after sequential design stages [16]. Zhengtong et al. proposed the use of a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for multi-plane lattice problems with different layout and design configurations [17]. Caferi et al. integrated Cultural Algorithm (CA) into PSO to create an efficient hybrid algorithm for optimal lattice structure design [18]. In addition, algorithms such as Genetic Algorithms (GA), Simulation Annealing (SA),

and Differential Evolution (DE) are also widely used in lattice design problem solutions [19-21].

3. MATERIAL AND METHOD

This study proposes a process that will design a lattice structure with maximum energy absorption ability. "Grasshopper," a commercial computational design software, was used to solve the identified problem. Grasshopper is a visual programming language that offers parametric modeling and coding on Rhino CAD [22-23]. Model creation, structural analysis, and optimization can be done with various plug-ins in this software.

There are many unique tools for the operations mentioned above and the like. One of them, Karamba3D enables engineers and designers to perform various structural analyzes and optimizations within the platform. Karamba3D creates more efficient and high-performance designs by considering factors such as material usage, weight and structural integrity [24]. It can be used actively in optimization processes with its integration with other plugins. Another popular plugin, "Galapagos," is a single-purpose shape optimization tool. Optimizing two or more parameters (genome) provides a fitness function that expresses the maximum or minimum numerical value.

The Galapagos plugin includes two different solvers, Evolutionary Algorithm and Simulated Annealing. The Evolutionary Algorithm starts with a certain number of randomly generated populations. Population variation is achieved by creating different genomes over several generations. Each generation's high-performing members (parents) are determined according to their fitness function. New members (children) are formed by crossing the parents. Members with a low fitness value are prevented from being passed on to the next generation. In addition, the entire solution space is scanned with the mutation applied to randomly selected members. This iterative process continues until the specified stopping condition is met [1-2].

The simulation annealing algorithm starts with a random initial solution. Due to its structure, the algorithm avoids local optima by navigating the solution space at the beginning. In the final stages, a precision search is performed to approach the fitness function [25]. It tries to find

solutions that meet or are close to the objective function [26]. The simulation annealing process is stopped when a certain number of iterations or the run time has elapsed. Like other heuristic search algorithms, there is always the possibility that the best solution may not be found.

4. RESULTS

This study proposes a computational design process to create 2D lattice geometries with high energy absorption capability. In the first stage of this process, all structures/beams forming the lattice geometry are parametrically modeled in the Grasshopper environment. The numerical range and boundary conditions that the parameters can take are also determined at this stage. A parameter's minimum and maximum value range are arranged so that it does not affect other parameters. The workflow for the study is shown in Figure 1.

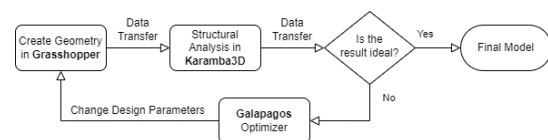


Figure 1. Computational design flowchart

The parametric lattice model used in this research is one of 8 axially equally divided parts of a square. Beam length, position, and angles are determined on one of these equally divided parts. As seen in Figure 2, three different parameters are created to obtain different lattice geometries. A slider is used to set these parameters manually. The sliders here allow dividing a beam length into 100 equal parts and bringing the connection points to the desired position. In the next step, the symmetries of this geometry are created around a diagonal axis. In the last stage, all of these geometries are reproduced by rotating them around a center. The resulting geometry is the unit lattice cell bounded by a square (Figure 3).

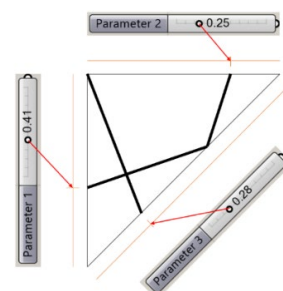


Figure 2. Unit geometry and parametric control representation

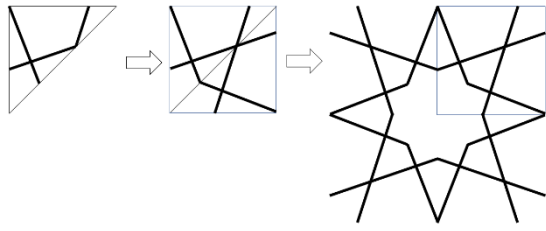


Figure 3. Parametric design steps and lattice unit cell

In order to perform structural analysis on the parametric model, the geometry must be converted to a structural analysis model. The Karamba3D plugin mentioned in the previous section was used in this conversion and analysis Process [24]. In order to determine the relationship of the lattice cell with other lattice cells, a 2x2 periodic structure is first created. In the next step, all beam and connection locations to be analyzed are determined. Then, the support coordinates and support forms to which the structure will be fixed are defined. In order to test the ability of this lattice structure to absorb energy and flex, the direction and magnitude of the loads and forces to be applied are regulated accordingly. After the material and cross-section of the lattice structure are determined, the structural analysis model is completed [24]. The created structural analysis model is shown in Figure 4. Here, the red arrows indicate the position and magnitude of the applied loads, while the green arrows indicate the reaction forces at the support points. The yellow and green markings in the lattice geometry (stress intensity decreases from yellow to green) indicate stress intensity.

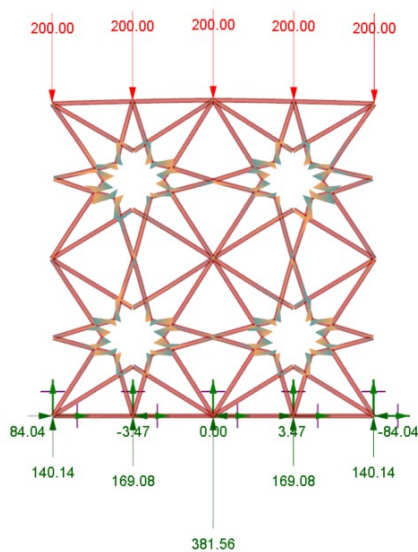


Figure 4. Structural analysis model of Lattice geometry

Since the comparison will be made between Lattice cells, the beam cross-section, size, material, numerical value, and unit of the applied force are unimportant. This study aims not to determine the energy absorption ability but to determine the lattice geometry with the highest energy absorption ability.

At the last stage of the computational design process, the lattice geometry with the highest energy dissipation ability was tried to be determined with the Galapagos optimizer. For this purpose, Input variables such as the value of the applied load, support positions, material, and cross-sectional area are kept constant. Galapagos iteratively performs the structural analysis processes with different combinations of three design parameters defined within certain rules. Here, two different optimization algorithms, Evolutionary Algorithm and Simulated Annealing are used [2, 25]. The ideal design concepts and energy absorption capabilities suggested by the algorithms are shown in Figure 5.

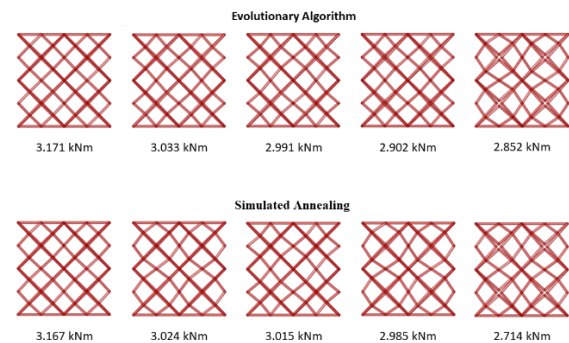


Figure 5. Design concepts generated by Evolutionary Algorithm (top) and Simulated Annealing (bottom)

5. DISCUSSION

This study highlights the effectiveness of the computational design process in detecting lattice geometries with superior energy absorption capabilities. By combining modelling, structural analysis, and optimization techniques, the method facilitates a thorough examination of the design landscape, generating a variety of lattice geometries.

Utilizing the Karamba3D plugin streamlines the structural analysis process and ensures precise evaluations of the lattice geometries. Moreover, developing the 2x2 periodic structure enables a more authentic assessment of the energy absorption potential of the lattice configurations

[24]. The Galapagos optimizer, on the other hand, is instrumental in identifying the lattice geometry with the most efficient energy dissipation capacity. Although the Evolutionary Algorithm and Simulated Annealing yielded comparable outcomes [27], neither has a clear advantage over the other. However, the fact that these two algorithms achieve similar results strongly indicates that the potential global best has been reached [21, 28].

Future investigations could broaden the design scope and enhance the performance of lattice geometries by incorporating additional design parameters and constraints. Integrating alternative optimization algorithms or multi-objective optimization techniques may offer a more in-depth understanding of the compromises between distinct performance metrics and uncover innovative high-performing lattice designs.

6. CONCLUSION

In conclusion, this study presents a computational design process for generating 2D lattice geometries with high energy absorption capabilities. The parametric modeling, structural analysis, and optimization processes were carried out within the Grasshopper environment using the Karamba3D plugin. By defining a set of parametric design rules and constraints, various lattice geometries were generated, analyzed, and optimized to find the optimal geometry with the highest energy absorption ability. The Galapagos optimizer was employed in the final stage of the computational design process, using two different optimization algorithms, Evolutionary Algorithm and Simulated Annealing. Although the best design concepts produced by both algorithms exhibited similar energy dissipation capabilities, the study found that neither algorithm provided a clear advantage over the other in this specific context. Nevertheless, the design concepts generated by these optimization algorithms show promising potential for being global best concepts.

This research demonstrates the power and flexibility of computational design methods in developing innovative and efficient lattice geometries for solving similar design problems. The insights gained from this study can be further explored and applied to various fields, such as architecture, engineering, and materials

science, to develop advanced structural solutions that address specific performance requirements. Moreover, future research can expand upon the presented methodology by incorporating additional design parameters, constraints, and optimization techniques, to develop even more effective lattice geometries for energy absorption and other applications. In addition, similar computational design processes can be developed for all outputs obtained with structural analysis models, such as weight, strength, volume, energy absorption, displacement, and Poisson's ratio of the designs produced.

ACKNOWLEDGES

This article was presented orally at the 6th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2022.

REFERENCES

1. Monedero, J., "Parametric design: a review and some experiences." *Automation in construction*, Vol. 9, Issue 4, Pages 369-377, 2000.
2. Gerber, D. and Lin, E., "Designing-in performance through parameterization, automation, and evolutionary algorithms", *Beyond Codes and Pixels: Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, Pages 141-150, Hong Kong, 2012
3. Wallach, J.C. and Gibson, L. J., "Mechanical behavior of a three-dimensional truss material", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, Pages 7181-7196, 2001.
4. Mead, D.J. and Parthan, S., "Free wave propagation in two-dimensional periodic plates", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 64, Issue 3, Pages 325-348, 1979.
5. Wadley, H.N., "Multifunctional periodic cellular metals", (in eng), *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, Vol. 364, Issue 1838, Pages 31-68, 2006.
6. Seepersad, C., "Applications of Additive Manufacturing in the Construction Industry a Prospective Review", *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Taiwan, 2017.
7. Hao, L., Raymont, D., Yan, Hussein, C.A. and Young, P. "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures", *The International*

Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria 2011.

8. Chang, T.-W., Moleta, T. J., & Park, D., "Computational design in the past, present and future of digital architecture," *Automation in Construction*, Vol. 72, Pages 1-2, 2016.

9. Fathi, A., Saleh, A., and Hegazy, M., "Computational Design as an Approach to Sustainable Regional Architecture in the Arab World," *Social and Behavioral Sciences*, Vol. 225, Pages 180-190, 2016.

10. Saha, A., and Ray, T., "Practical Robust Design Optimization Using Evolutionary Algorithms." *ASME. Journal of Mechanical Design*, Vol. 133, Issue 10, Pages 101012, 2011.

11. Cagan, J., Grossmann, I.E., and Hooker, J., "A conceptual framework for combining artificial intelligence and optimization in engineering design," *Research in Engineering Design*, Vol. 9, Pages 20–34, 1997.

12. Doğru, M. B., "Topoloji optimizasyonu yardımıyla bir alternatörün tasarım eniyilemesi," *Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir*, 2019.

13. Poyraz, M., "Bir kamyon şasisinin yapısal optimizasyonu" *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2004.

14. Larsson, R. "Methodology for topology and shape optimization: Application to a rear lower control arm", Master's thesis, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Göteborg, 2016.

15. Yıldız, A. R., "Taşıt elemanlarının yapısal optimizasyon teknikleri ile optimum tasarımı," *Politeknik Dergisi*, Vol. 20, Issue 2, Pages 319-323, 2017.

16. Raina, A., McComb, C. and Cagan, J. "Learning to Design from Humans: Imitating Human Designers Through Deep Learning", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 141, Issue 11, 2019.

17. Zhengtong, H., Zhengqi, G. Xiaokui, M. and Wanglin, C., "Multimaterial layout optimization of truss structures via an improved particle swarm optimization Algorithm", *Computers & Structures*, Vol. 222, Pages 10-24, 2019.

18. Jafari, M., Salajegheh, E. and Salajegheh, J., "Optimal design of truss structures using a hybrid method based on particle swarm optimizer and

cultural algorithm," *Structures*, Vol. 32, Pages 391-405, 2021.

19. Neeraja, D., Kamireddy, T., Potnuru, S.K. and Vijay Simha, R., "Weight optimization of plane truss using genetic algorithm," *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, Vol. 263, Issue 3, 2017.

20. Vu, V.T., "Weight minimization of trusses with natural frequency constraints", 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation, Sydney, 2015.

21. Millán-Páramo, C., "Modified simulated annealing algorithm for discrete sizing optimization of truss structure," *Jordan Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, Issue 4, 2018.

22. Thomas, W., "Architectural Design Optimization—Results from a User Survey," *KnE Social Sciences*, Vol. 3, Issue 27, 2019.

23. Herrema, A. J., Wiese, N. M., Darling, C. N., Ganapathysubramanian, B., Krishnamurthy, A., and Hsu, M.-C., "A framework for parametric design optimization using isogeometric analysis," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 316, Pages 944-965, 2017.

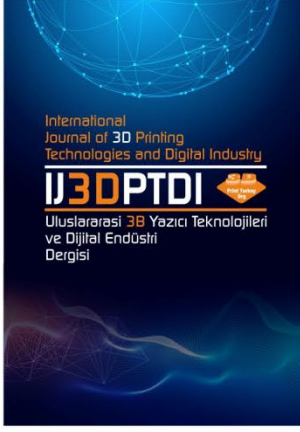
24. Estrada Meza, M.G., González Meza, E., Chi Pool, D.A. and McNamara Trujillo, J.S., "Design Exploration of Bamboo Shells Structures by Using Parametric Tools," *Applied Sciences*, Vol. 12, Issue 17, Pages 7522, 2022.

25. Ünsal, M. G., "Karesel atama problemi için deterministik tavlama benzetim yöntemlerinin karşılaştırılması," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Vol. 18, Issue 2, Paper 37-46, 2013.

26. Kolahan, F., Abolbashari, M. H. and Mohitzadeh, S., "Simulated annealing application for structural optimization," *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Vol. 1, Issue 11, Pages 120-123, 2007.

27. Wong, K.C., Leung, K. and Wong, M.H., "Effect of Spatial Locality on an Evolutionary Algorithm for Multimodal Optimization", *Applications of Evolutionary Computation*, Vol. 6024, Pages 481-490, 2010.

28. Jong, K., "De Evolutionary Computation – A Unified Approach," Pages 327–342, MIT Press, 2006.



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>

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) FİLAMENLERİN NEMLİ ORTAMA MARUZ KALMALARI SONUCU MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE CHANGE IN THE MECHANICAL AND PRINT PROPERTIES OF THE POLY(LACTIC ACID) FILAMENTS USED IN 3D PRINTERS AS A RESULT OF EXPOSURE TO HUMID ENVIRONMENT

Yazarlar (Authors): Gökçen Şahin^{ID*}, Hasan Özyıldırım^{ID}, Anıl Şahin^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Şahin G., Özyıldırım H., Şahin A., "3 Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Poli(Laktik Asit) Filamentlerin Nemli Ortama Maruz Kalmaları Sonucu Mekanik Ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 204-219, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1221552

Araştırma Makale/ Research Article

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

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) FİLAMENTLERİN NEMLİ ORTAMA MARUZ KALMALARI SONUCU MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

Gökçen Şahin^a, Hasan Özyıldırım^b, Anıl Şahin^c

^a Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji, TÜRKİYE

^b Trakya Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, TÜRKİYE

^c Trakya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: gokcensahin@trakya.edu.tr

(Received: 20.12.22; Revised: 16.04.23; Accepted: 11.08.23)

ÖZ

Bu çalışmada, 3 boyutlu (3B) yazıcılarda kullanılan poli(laktik asit) (PLA) filamentlerinin ve Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) esaslı 3B yazıcı kullanılarak üretilen PLA standart çekme numunelerinin mekanik ve baskı özelliklerinin nemli ortamlarda nasıl değiştiği incelenmiştir. Filamentler 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortama 5, 10, 15, 20 gün süreler ile maruz bırakılarak şartlandırılmış numuneler üretilmiştir. Bu filamentlere ve üretilen standart çekme numunelerine çekme testi uygulanmış, FTIR spektrometresi ile analizleri yapılmış ve kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Şartlandırılmış filament ve standart çekme numunelerinin çekme dayanımları 20. günde sırası ile 3,7 MPa (%6,8) ve 3,6 MPa (%6,8) düştüğü fakat bekletme süresinin çekme dayanımları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları bekletme gün sayısı ile orantılı olarak azalmış ve çekme dayanımındaki en büyük düşüş 11,6 MPa (%29,5) değerinde 15. günde gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: PLA Filament, 3B Yazıcı, Filamentlerin Mekanik Özellikleri, 3B baskı.

INVESTIGATION OF THE CHANGE IN THE MECHANICAL AND PRINT PROPERTIES OF THE POLY(LACTIC ACID) FILAMENTS USED IN 3D PRINTERS AS A RESULT OF EXPOSURE TO HUMID ENVIRONMENT

ABSTRACT

In this study, it was investigated how the mechanical and printing properties of poly(lactic acid) (PLA) filaments used in 3D printers and PLA standard tensile samples produced using 3D printer based on Fused Deposition Modeling (FDM) change in humid environments. Conditioned samples were produced by exposing the filaments to 25 °C temperature and 80% relative humidity for 5, 10, 15, 20 days. Tensile test was applied to these filaments and produced standard tensile samples, analyzed with FTIR spectrometer and scanning electron microscope (SEM) images of fracture surfaces were taken. The tensile strengths of the conditioned filament and standard tensile samples decreased by 3.7 MPa (6.8%) and 3.6 MPa (6.8%) on the 20th day, respectively, but the holding time did not have a significant effect on the tensile strengths. The tensile strength of standard tensile specimens printed from conditioned filament decreased in proportion to the number of days of holding, and the greatest decrease in tensile strength occurred on the 15th day at a value of 11.6 MPa (29.5%).

Keywords: PLA Filament, 3D Printer, Mechanical Properties of Filaments, 3D printing.

1. GİRİŞ

3B baskı yenilikçi ve çok yönlü bir teknoloji aşaması olarak ortaya çıkmış, üretim verimliliğini arttırmak için yeni imkanlar sağlamıştır. 3B baskı teknolojileri 1980'lerden beri vardır. Son zamanlardaki malzeme, makine ve yazılımdaki hızlı gelişmeler ile daha geniş bir kullanıcı kitlesi için erişilebilir haldedir. Günümüzde masaüstü 3B yazıcıların maliyeti bireysel ve endüstriyel kullanıcılar için elde edilebilir seviyededir. Mevcut düşük maliyetli masaüstü ve tezgah üstü, profesyonel 3B yazıcılar ev ürünleri, yara örtüleri, dikişler, diş telleri, ambalaj, havacılık, otomotiv, tıp ve endüstri alanlarındaki birçok uygulamada tercih edilen bir seçenek olmuştur [1-3]. 3B yazıcılar pratik olmaları ve kolay kullanımları sayesinde inovasyonu hızlandırmakta; imalat, mühendislik, sağlık, eğitim, diş hekimliği, odyoloji ve mücevherat gibi çeşitli sektörlerdeki işletmeler tarafından kullanılmaktadır. Çok sayıda amatör kullanıcı hobi veya iş amaçlı olarak bu yazıcı ve filamentleri kullanmaktadır [4-5].

Polilaktik asit (PLA) biyolojik olarak parçalanabilen ve %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çok yönlü kullanımı olan bir polimerdir [3,6-7]. PLA farklı kullanımlarının yanı sıra 3B baskıda hem profesyonel hem de amatör kullanıcılar tarafından kullanılan en yaygın biyobozunur filamenttir. Çoğu masaüstü 3B yazıcıda baskı için önerilen "varsayılan" malzemedir [8-12]. PLA filamenti yazdırma esnasında toksik koku üretmediği için kapalı ortamlarda kullanımı güvenlidir. PLA filamentin yazdırılması kolaydır ve yazdırma esnasında genellikle sorun çıkarmaz [2,8-12].

PLA filamentlerde sıklıkla karşılaşılan problemlerin başında filamentlerin nem, sıcaklık gibi çevresel şartlara maruz kalmaları sonucu baskı kalitelerinde yaşanan olumsuz değişimler ve mekanik dayanımlarındaki azalmadır [13]. 50 °C sıcaklık ve %90 bağıl nemli ortamda, hem amorf hem de kristal enjeksiyon kalıplama dereceli PLA reçine numuneleri önemli nem emilimi göstererek hidrolizin gerçekleşmesine izin verirler [14]. 70 °C ve %80 bağıl nemli ortamda nem ve sıcaklık koşullandırması sırasında kimyasal değişim meydana gelir ve polimer zincir kırılması gerçekleşir [15]. Sıcaklıktaki artış, nem alma oranındaki ve kristalleşme miktarındaki artışa

neden olur. Suya daldırılmış numunelerin kristallik derecelerindeki artışlarla bağlantılı olarak camsı geçiş ve erime sıcaklıklarındaki düşüşler, kurutulmuş PLA numuneler ile karşılaştırıldığında açık bir şekilde belirlenmiştir [16]. Neme maruz kalma mekanik özelliklerde de önemli düşüşlere neden olmaktadır [17].

İncelenen literatür çalışmalarında eksiklik olarak belirlenen PLA filamentlerin ve baskı ürünlerinin farklı sürelerdeki değişen mekanik, baskı ve kimyasal özelliklerindeki değişimi araştırmak amacı ile araştırmacılar tarafından nem şartlandırma koşulu olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında numunelerin mekanik, baskı ve yüzey özellikleri gibi parametreleri incelenmiştir. Bunun için PLA filamentler oda sıcaklığı kabul edilen 25 °C sıcaklık ve ülkemizdeki ortalama en yüksek nem oranı olan %80 bağıl nemli ortam koşulları oluşturularak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bekletme süresi olarak yapılan ön çalışmalar neticesinde 5, 10, 15 ve 20 günlük süreler seçilmiştir. Bu ortamlarda şartlandırılmış filamentlerden çeşitli numuneler üretilmiştir. Filamentlerin mekanik özelliklerinin değişiminin belirlenebilmesi için hem filament hem de filamentlerden üretilen standart çekme numuneleri çekme testine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmış, nemin filamentler üzerindeki kimyasal etkisini değerlendirmek için FTIR analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ülkemizin ortalama nem koşullarının PLA filamentlerin vakumlu poşetlerinden açıldıktan sonra kullanımı veya çeşitli kompozitlerine etkisinin araştırılması amacı için yapılacak çalışmalarda kullanılabilecek optimum bekletme gün sayısı tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Deneyleerde Kullanılan Filament

Çizelge 1. PLA filamentin teknik özellikleri.

Üretici Firma	Microzey
Malzeme Cinsi	PLA
Filament Yoğunluk	1,24 g/cm ³
Filament Çapı	1,75 mm/±0,05 mm
Baskı Sıcaklığı	200-220 °C
Baskı Tabla Sıcaklığı	60-80 °C
Baskı Hızı	25-100 mm/s
Baskı Tabla Önerisi	Buildtak/pei

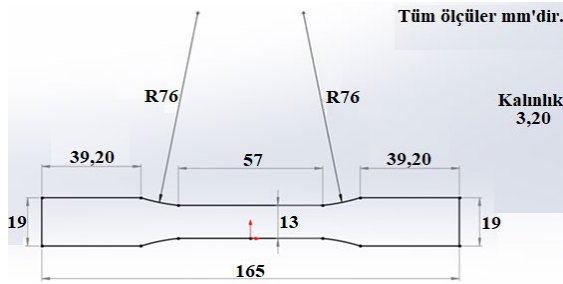
Deneylerde PLA'dan üretilmiş 1,75 mm çapında 0,5 kg ağırlıkta makaraya sarılı ve vakumlu pakette bulunan ticari beyaz renkli filament kullanılmıştır. Filamente ait teknik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2. Numunelerin Üretilmesi

Numuneler (Şekil 1) çekme dayanımlarının belirlenmesi için ASTM D638-14 (Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi) Standartı Tip I numuneye uygun ölçülerde PLA filamentlerden üretilmişlerdir [18]. Numune şekli ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çekme numunesi.



Şekil 2. ASTM D638-14 Tip I'e göre standart çekme numunesi boyutları.

Numunelerin 3B yazıcıda yazdırılabilmesi için dilimleyici yazılımı olarak Ultimaker Cura 3B baskı yazılımı kullanılmıştır. PLA numunelerin yazdırılması için kullanılan parametreler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çekme deneylerinde kullanılacak olan standart çekme numuneleri verilen yazdırma parametreleri uygulanarak Creality marka EYM teknolojili (Model: CR-10 S4, Creality, Shenzhen, China) 3B yazıcıda yazdırılmıştır (Şekil 3). Tüm yazdırma işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve her bir yazdırma işleminde 5 adet numune yazdırılmıştır (Şekil 3).

Yazdırılan tüm numunelere yapılacak deneysel çalışmalara göre seri numaraları verilmiştir. Verilen seri numaralarında; F-REF referans PLA filament numunesi, F-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA filament numunesi, K-REF referans PLA filamentten basılmış standart çekme numunesini, K-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA standart çekme

numunesini, FK-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA filamentten basılmış standart çekme numunesini, 5, 10, 15, 20 değerleri ise nemli ortamda bekletme gün sayısını temsil etmektedir.

Çizelge 2. 3B yazıcıda PLA numunelerin yazdırılması için kullanılan parametreler.

Filament Cinsi	PLA
Nozul	
Nozul Çapı	0,4 mm
Kalite	
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Dolgu	
Dolgu Yoğunluğu	%100
Dolgu Şekli	Grid
Malzeme	
Yazdırma (Nozul) Sıcaklığı	210 °C
Yazdırma (Baskı) Tablası Sıcaklığı	60 °C
Hız	
Yazdırma Hızı	60 mm/s
Gezinti	
Geri Çekmeyi Etkinleştirme	Evet
Soğutma	
Baskı Soğutma Etkinleştirme	Evet
Fan Hızı	%100
Baskı Tabla Yapışması	
Baskı Tabla Yapışması Çeşidi	Brim

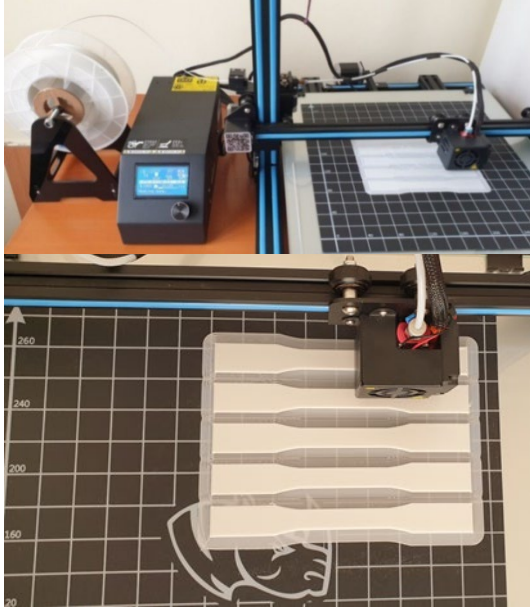
2.3. Numunelerin Şartlandırılması

Filament ve üretilen standart çekme numuneleri nemin PLA üzerindeki etkisinin incelenmesi için iklimlendirme kabini içerisinde 25±0.5 °C sıcaklık ve %80±2 bağıl nem de 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir.

2.4. Numunelere Yapılan Analiz ve Deneyler

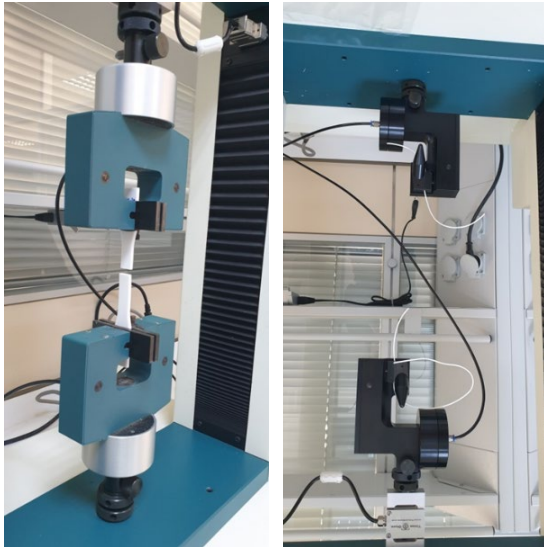
Filament ve standart çekme numunelerine çekme deneyleri ASTM D638-14 standardına göre Tinius Olsen Universal Testing Machines (Model: H10KS, Tinius Olsen, United Kingdom) test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Çekme deneyleri esnasında cihazdan çekme kuvveti (N) ve yer değiştirme (mm) değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyleri filament numunelere 200 mm/dk ve standart çekme numunelerine 5 mm/dk [18-19] kafa ilerleme hızında uygulanmıştır.

FTIR analizleri Perkin Elmer (Model: Frontier, Perkin Elmer, United States) FT-IR, NIR and FIR Spectroscopy cihazında yapılmıştır.



Şekil 3. Standart çekme numunelerinin yazdırılması.

Numunelere ait baskı ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Zeiss (Model: EVO® LS10, Zeiss, Oberkochen, Germany) elektron mikroskopunda 50-2000x büyütme aralıklarında alınmıştır.



Şekil 4. Standart çekme ve filament numunelerin çekme deneyi.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Filament ve üretilen standart çekme numuneleriyle yapılan çekme deneyleri sonucunda test cihazından kuvvet (N) ve uzama (mm) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak numunelere ait çekme dayanımı (MPa)–uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Tüm numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası

elde edilen çekme dayanımları Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 3. Çekme deneyi sonuçları.

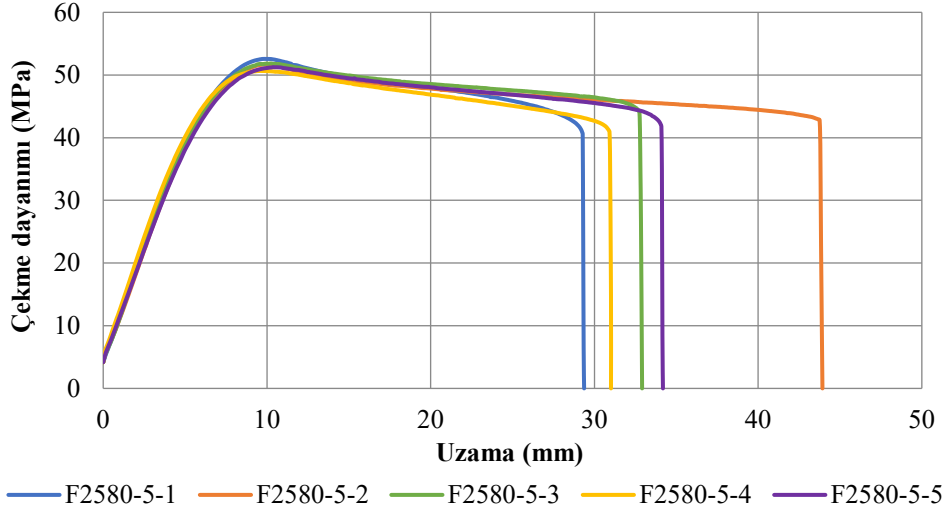
Deney Numarası	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)
F2580-5	Filament	51,6±0,71
F2580-10	Filament	52,2±0,65
F2580-15	Filament	51,2±0,67
F2580-20	Filament	51,0±0,93
FK2580-5	Çekme	34,3±0,54
FK2580-10	Çekme	31,2±0,28
FK2580-15	Çekme	27,7±0,43
FK2580-20	Çekme	28,0±0,58
K2580-5	Çekme	50,2±0,71
K2580-10	Çekme	50,5±0,76
K2580-15	Çekme	50,0±0,78
K2580-20	Çekme	49,6±0,47

3.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının ve SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

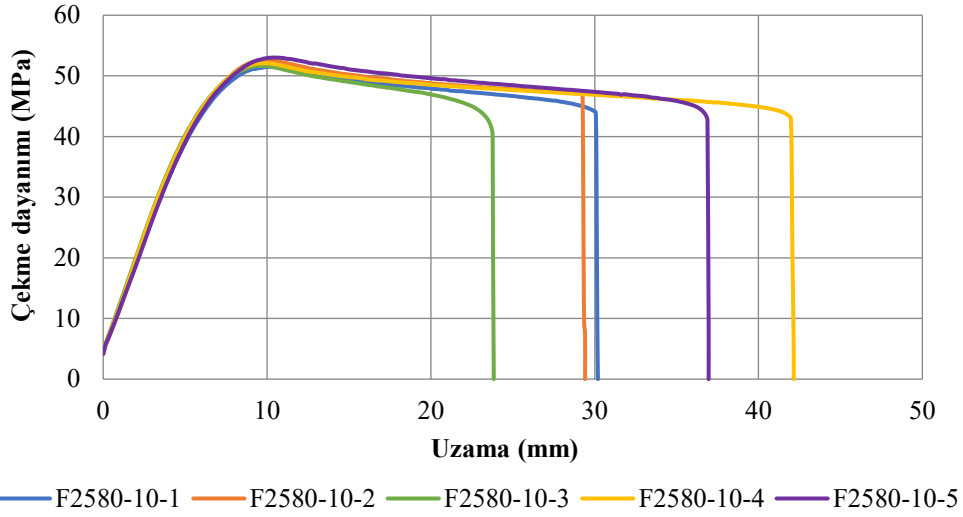
PLA filamentini 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait çekme dayanımı (MPa)–uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5’te filament numunelere ait çekme dayanımı–uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış tüm numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin nemli ortamda bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde olumlu veya olumsuz yönde önemli bir etkisi olmamıştır.

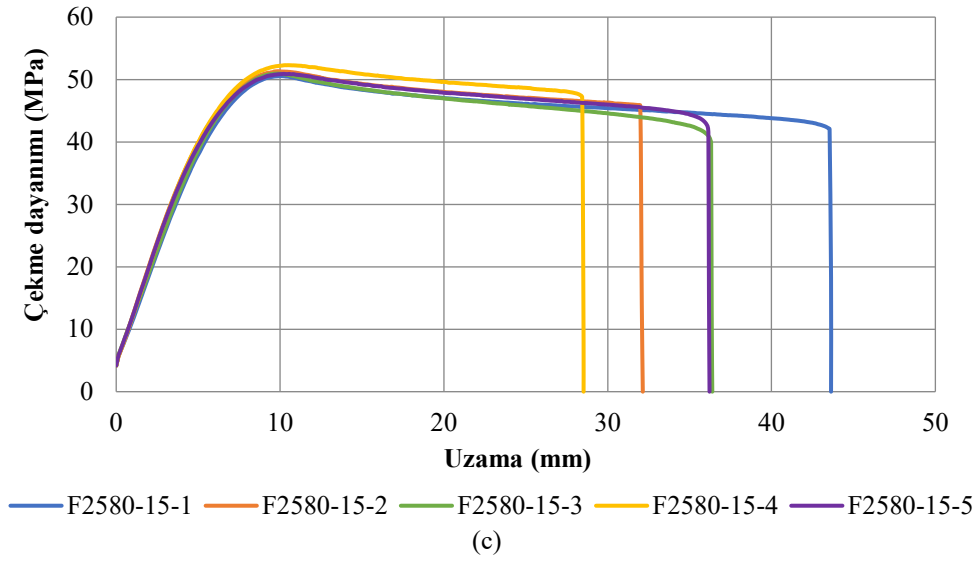
Filament numunelere ait çekme dayanımı grafiği incelendiğinde (Şekil 6) en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı nemli ortamda 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Nemli ortamda bekletme süresinin artması ile numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. Ancak çekme dayanımlarındaki azalma tüm sürelerde birbirine yakındır. Dayanımın değişmesinde süre önemli bir etken olmamıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6.8 oranında azalmıştır.



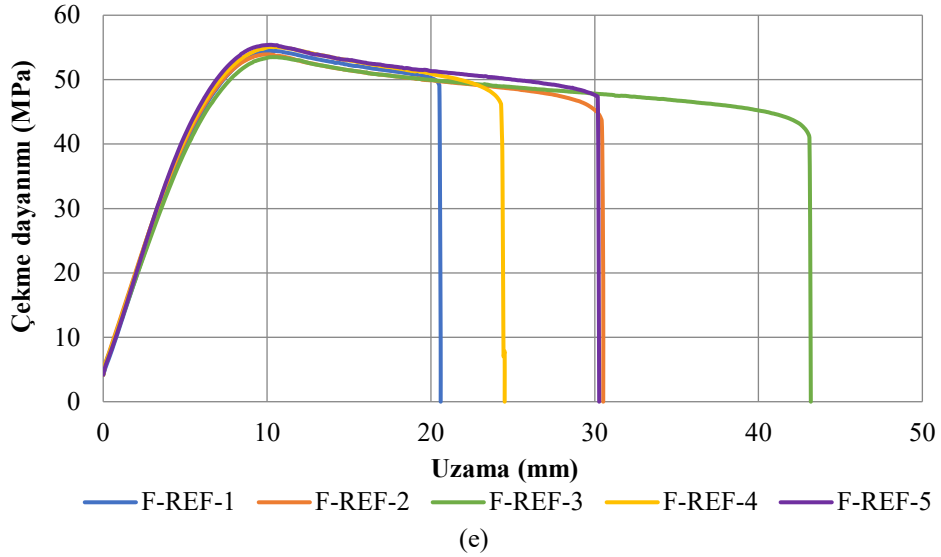
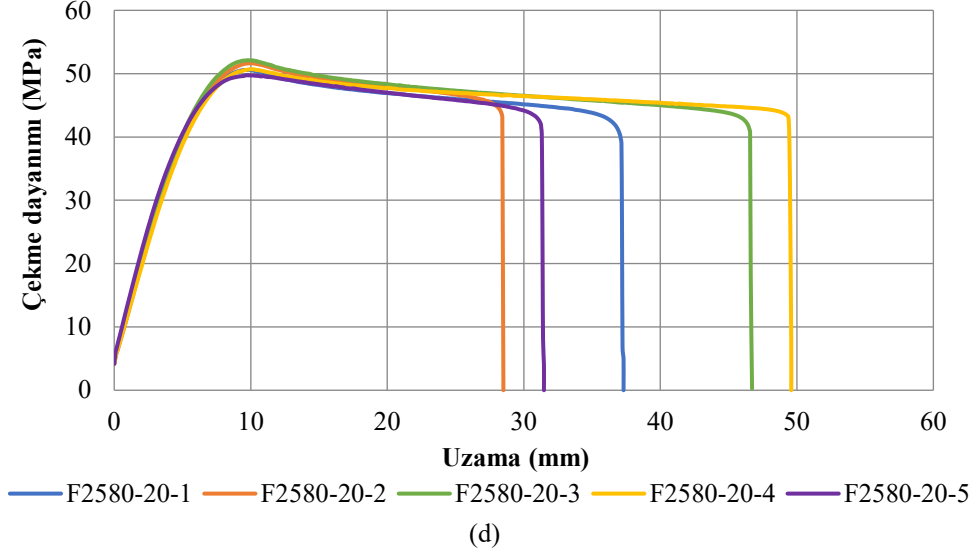
(a)



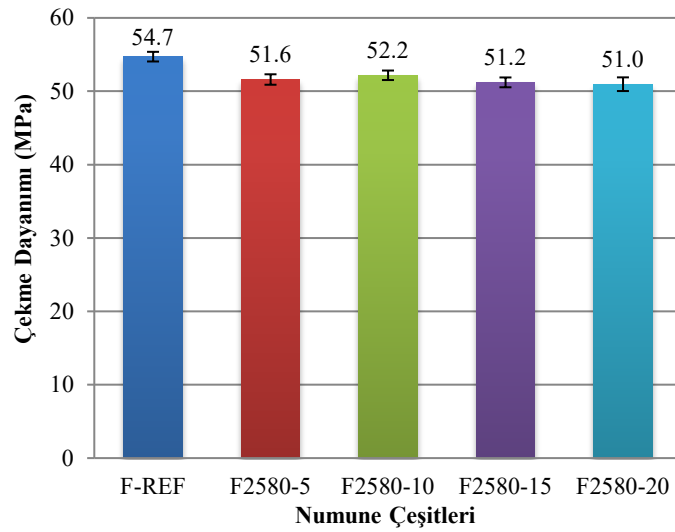
(b)



(c)



Şekil 5. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış filament numunelerin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.

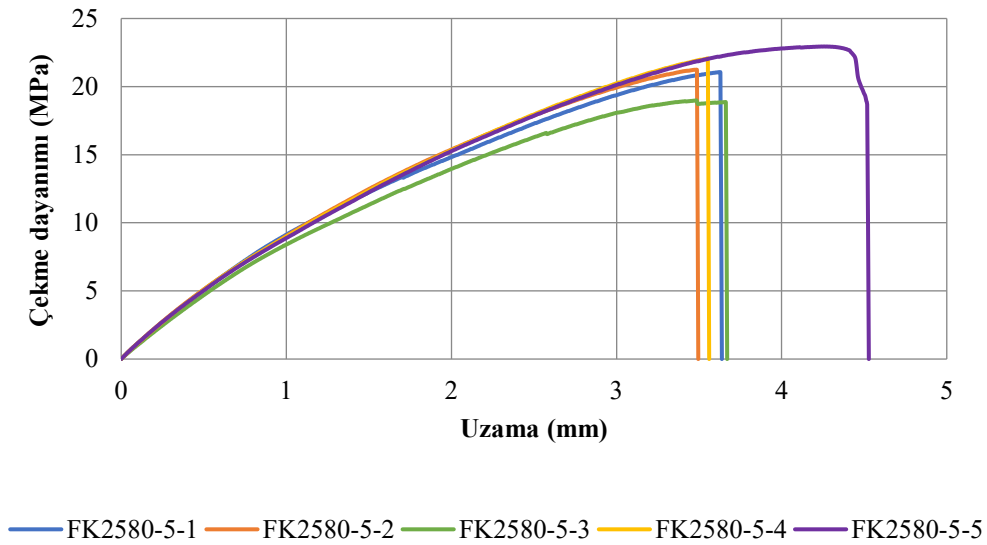


Şekil 6. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

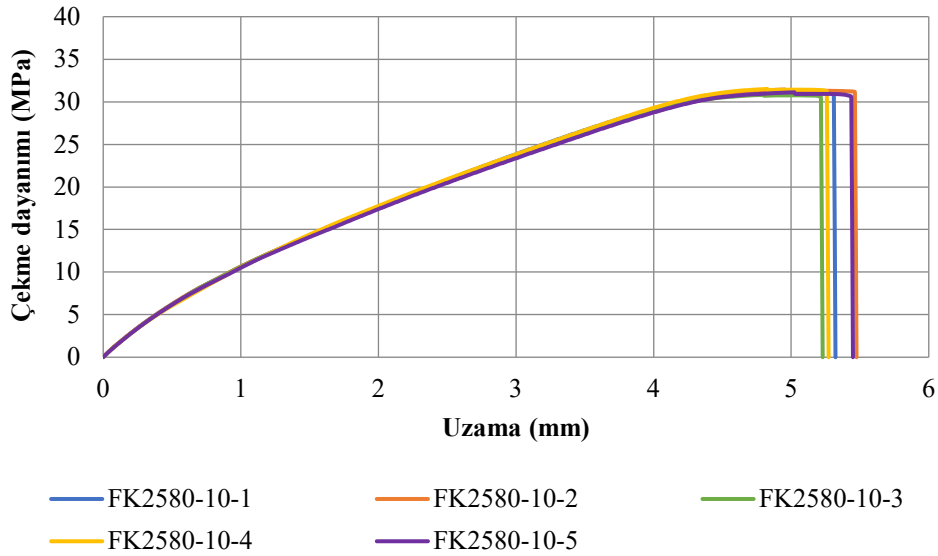
25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde filamenti 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için şartlandırılmış olan bu filamentlerden üretilen standart çekme numunelerine çekme deneyi uygulanmış ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Çizilen bu eğriler Şekil 7’de verilmiştir.

Referans numuneye ait (Şekil 7e) ve 10 gün süre ile şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesine ait (Şekil 7b) eğrileri incelendiğinde her iki numune de maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve belirli bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da

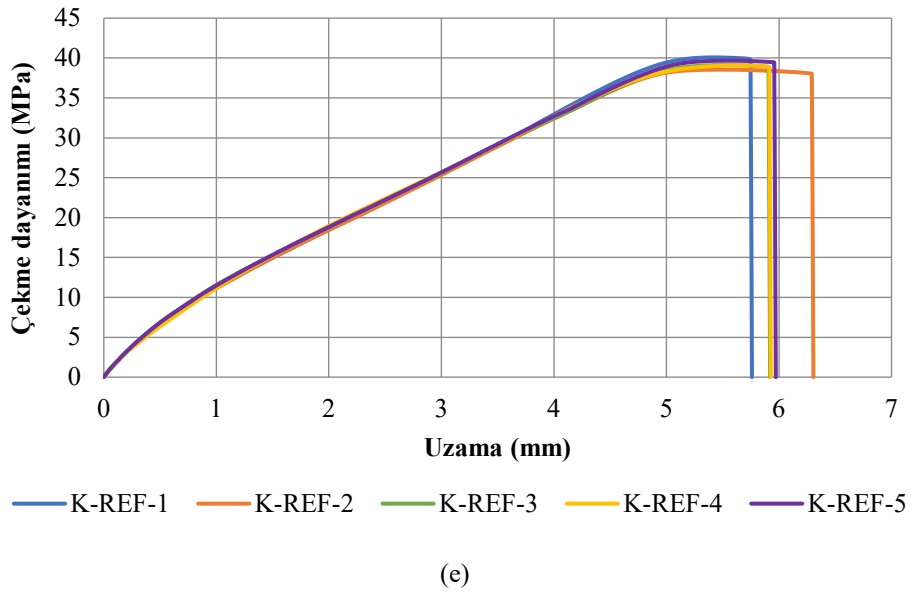
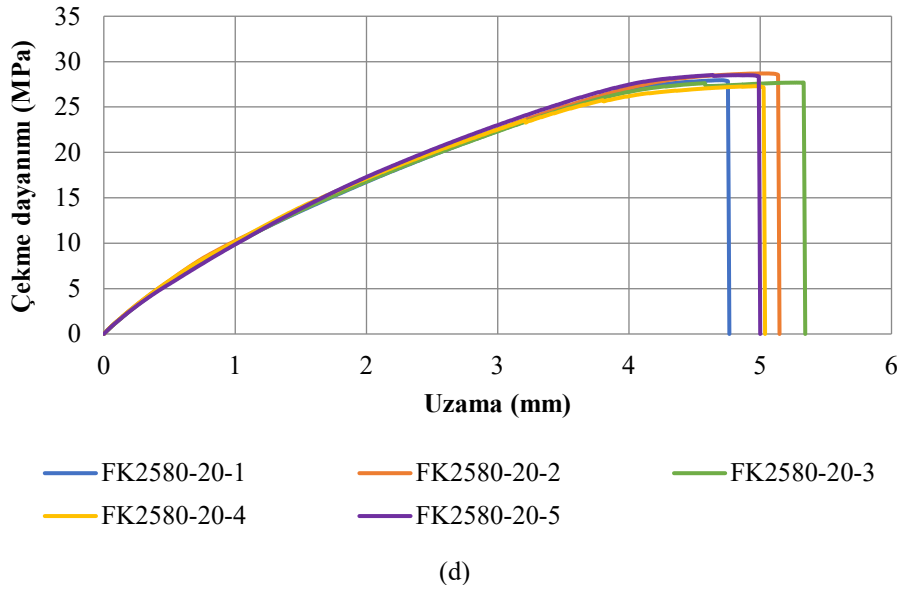
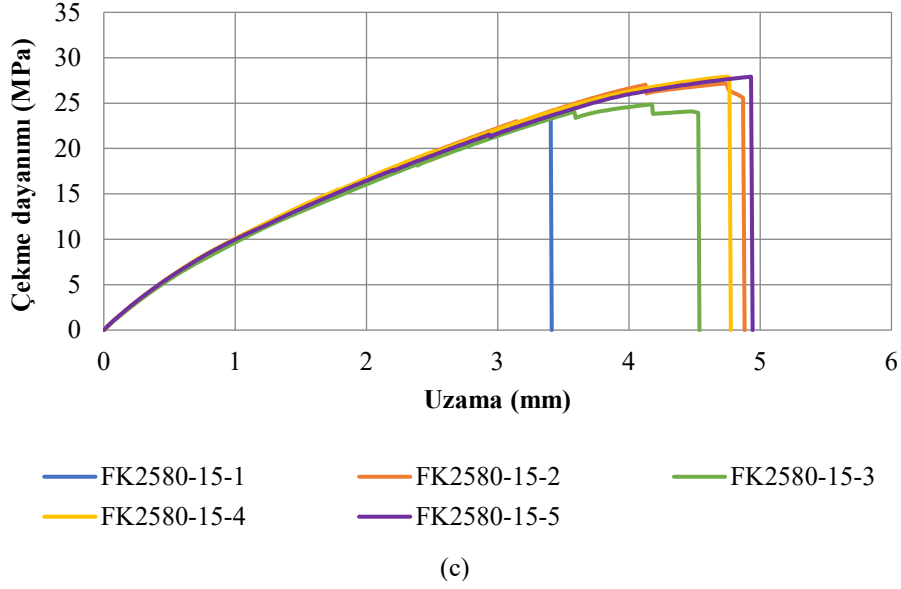
malzemelerin yarı sünek olduğunu göstermektedir. Fakat şartlandırılmış filamentlerden basılan standart çekme numunelerine ait (Şekil 7a, c, d) eğrileri incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında kopmuşlardır. Bu da malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir. Filamentlerin nemli ortamda bekletilmelerinin basılan standart çekme numunelerinin hasar davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Fakat 10 gün süre ile şartlandırılmış filamentten üretilen numunenin çekme dayanımı azalmasına rağmen referans numune ile benzer kopma davranışı sergilemiştir.



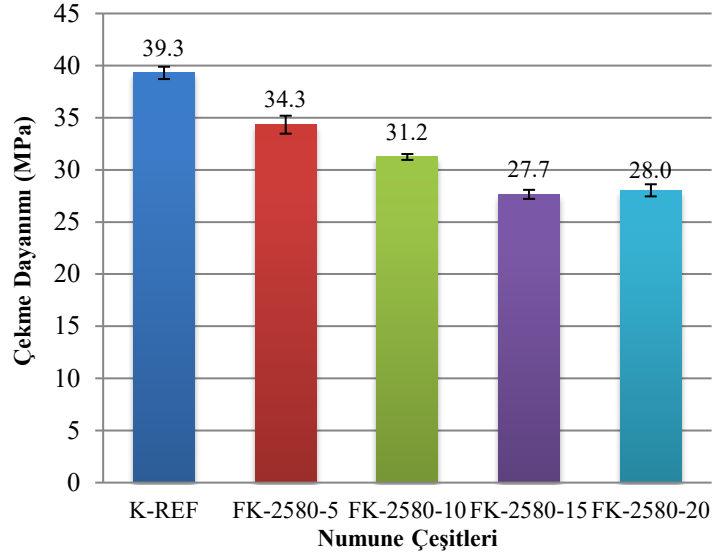
(a)



(b)



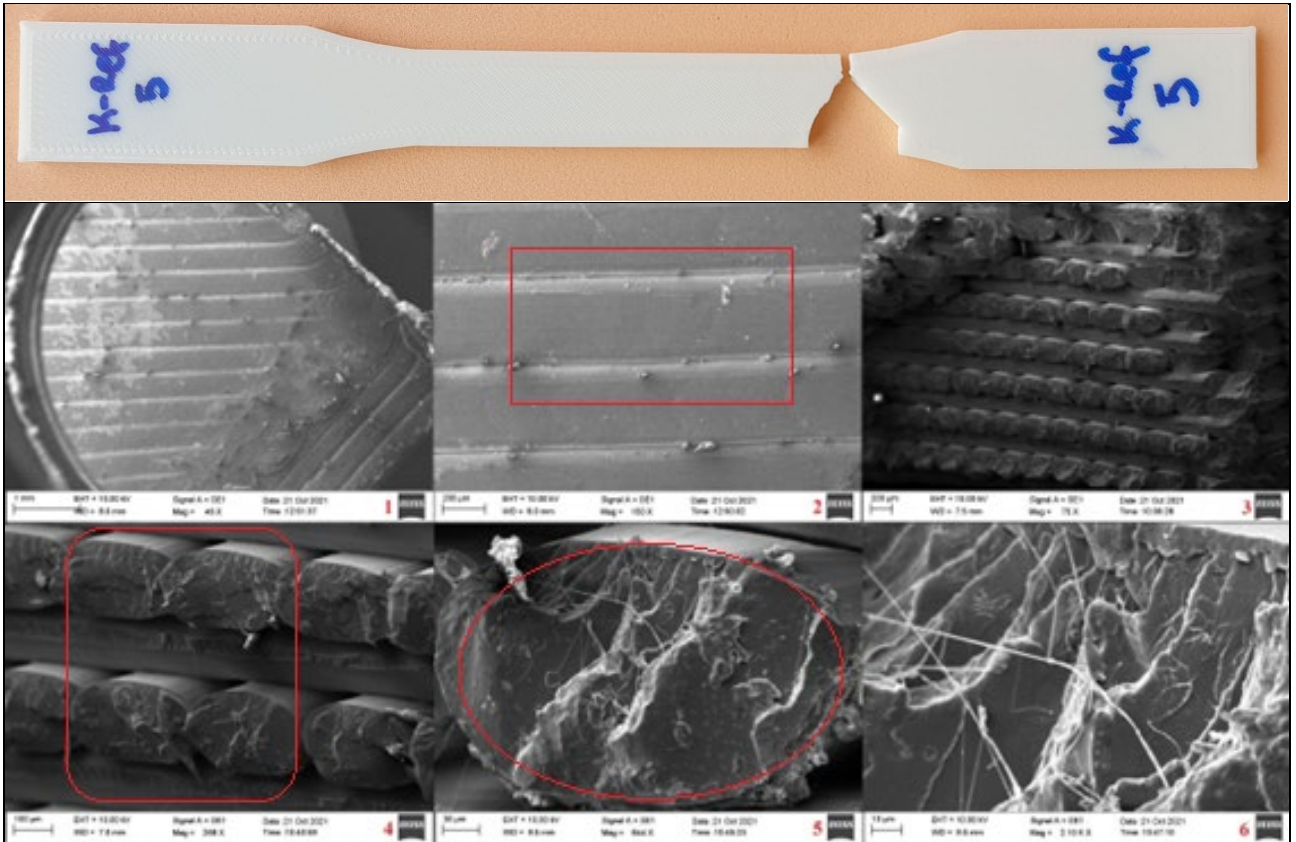
Şekil 7. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.



Şekil 8. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.

Şartlandırılmış filamentlerden basılan standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 8) incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesinde elde

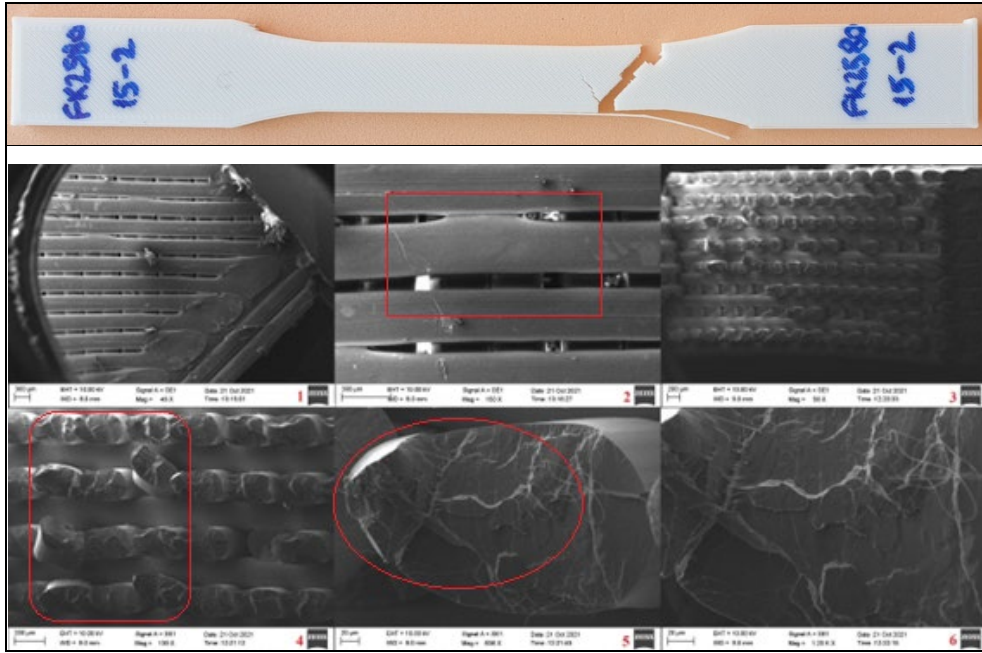
edilmiştir. Bekleme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. 15 gün bekletilen numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %29 oranında daha düşüktür.



Şekil 9. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 9 ile verilen referans standart çekme numunesine ve Şekil 10 ile verilen 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesine ait 3, 4, 5 ve 6. SEM görüntüleri incelendiğinde; referans numunede kırılma daha yumuşak ve sünek olarak gerçekleşirken şartlandırılmış olan numunede kırılma daha keskin, gevrek olarak gerçekleşmiştir. Şartlandırılmış filamentler kırılma esnasında aynı anda farklı noktalardan da kırılmıştır (Şekil 10-4). Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 7) kırılma durumlarını desteklemektedir.

Şekil 9'daki 1. ve 2. görüntüler referans standart çekme numunesinin yüzeylerini, Şekil 10'daki 1. ve 2. görüntüler ise 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesinin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler şartlandırılmış numunedeki baskı kalitesinin düştüğünü göstermektedir. Referans numune yüzeylerinde baskı esnasında filamentler birbirine yapışmıştır oysa şartlandırılmış numunede filamentler arasında çok fazla boşluk oluşmuş filamentler birbirine yapışmamıştır. Bu da baskı ve yüzey kalitesinin bozulmasına ve çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.



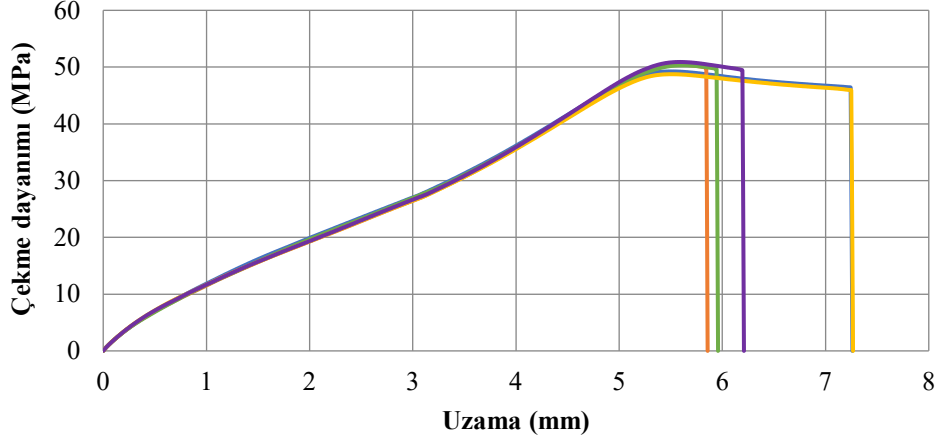
Şekil 10. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentten basılan standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

PLA standart çekme numuneleri 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmış ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Standart çekme numuneleri için çizilen eğriler Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11'de referans ve şartlandırılmış standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referansa ait (Şekil 11e) ve şartlandırılmış numunelere ait (Şekil 11a, b, c, d) eğrileri birlikte incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve belirli bir uzama sonrası kopmuşlardır.

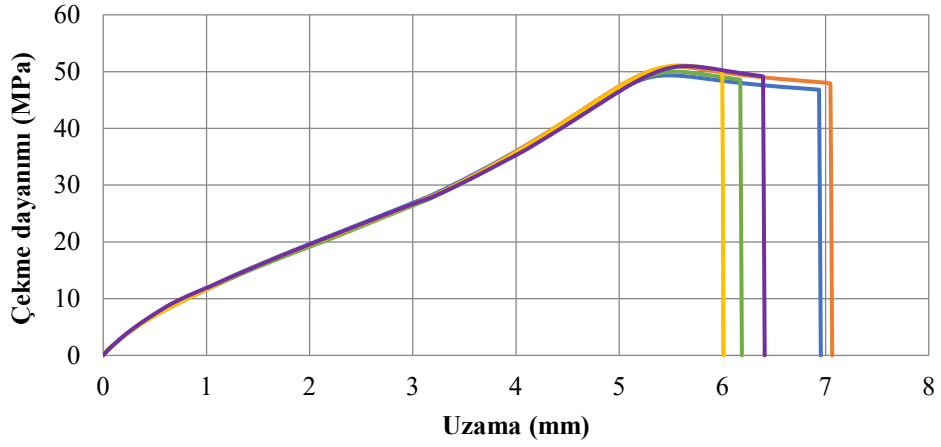
Bu durumda numunelerin sünek olduklarını göstermektedir. Standart çekme numunelerinin nemli ortamda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 12) incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Bekletme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır fakat bu azalma birbirine yakındır. 20 gün bekletilen numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6,8 oranında azalmıştır.



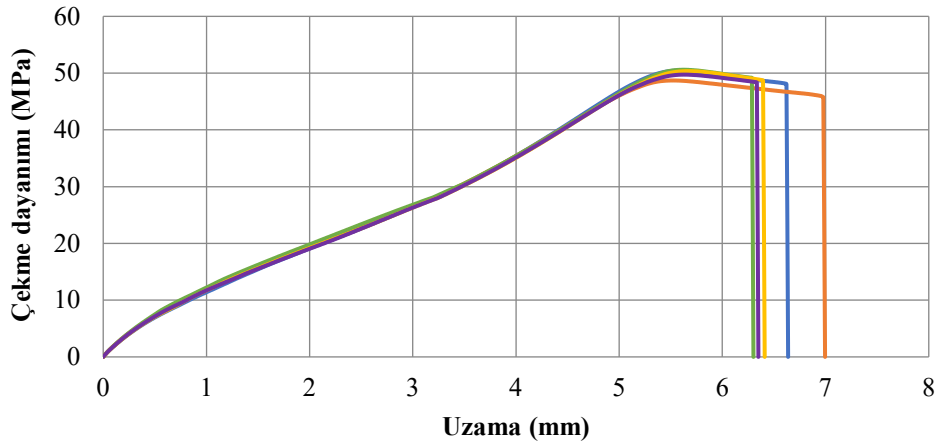
— K2580-5-1 — K2580-5-2 — K2580-5-3 — K2580-5-4 — K2580-5-5

(a)



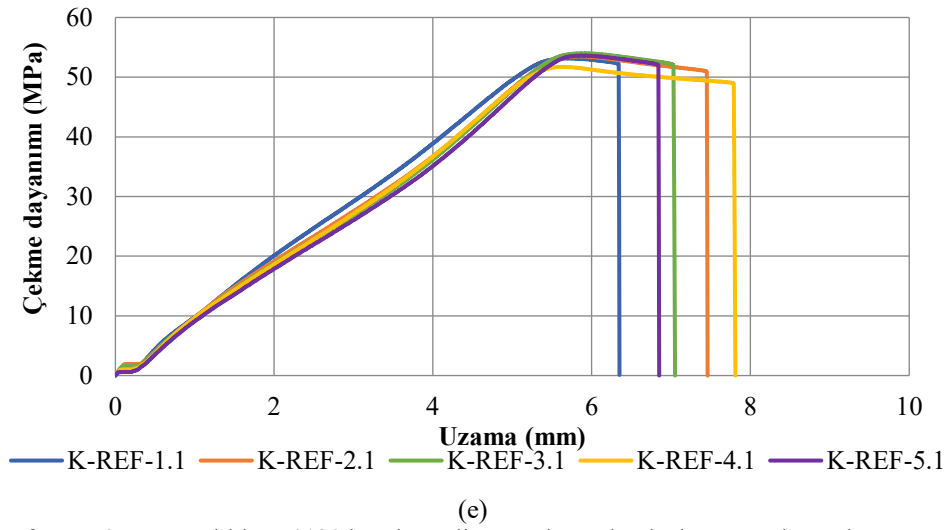
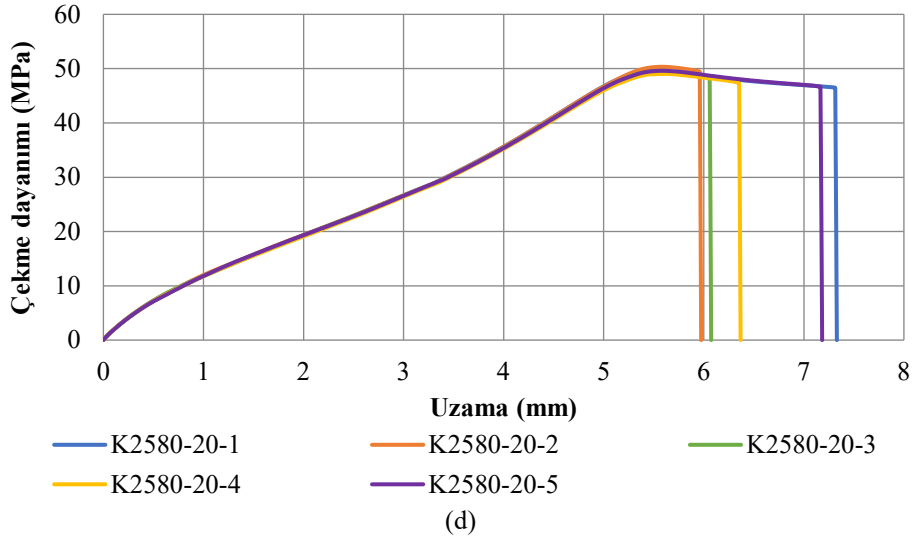
— K2580-10-1 — K2580-10-2 — K2580-10-3 — K2580-10-4 — K2580-10-5

(b)

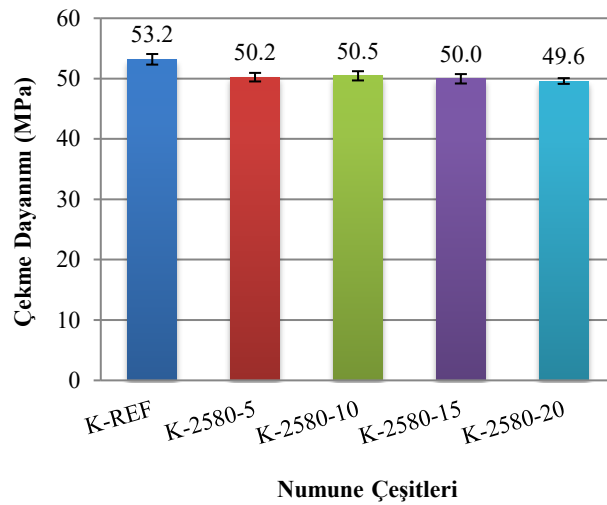


— K2580-15-1 — K2580-15-2 — K2580-15-3 — K2580-15-4 — K2580-15-5

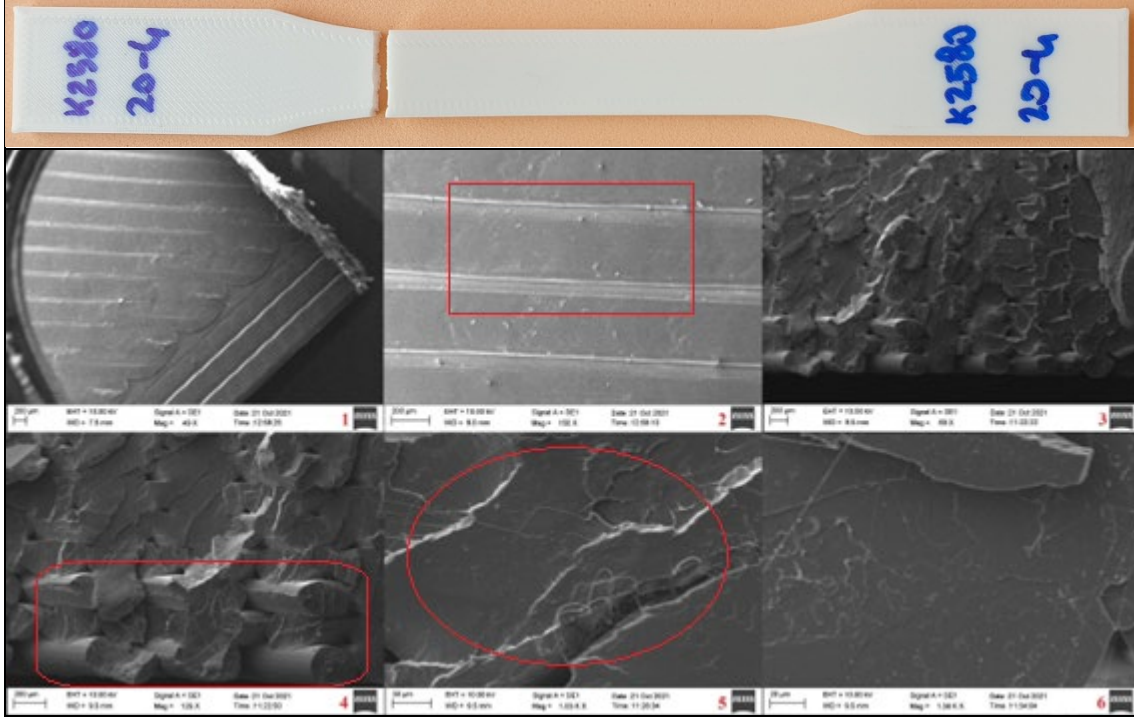
(c)



Şekil 11. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış standart çekme numunelerinin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.



Şekil 12. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.



Şekil 13. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 9 ile verilen referans standart çekme numunesine ve Şekil 13 ile verilen 20 gün bekletilmiş standart çekme numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3, 4, 5 ve 6. görüntülerde numunelerin ve numuneler içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Hem referans numune hem de şartlandırılmış numunede kırılma sünek olarak gerçekleşmiştir. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 11) bu sünek kırılma durumunu desteklemektedir.

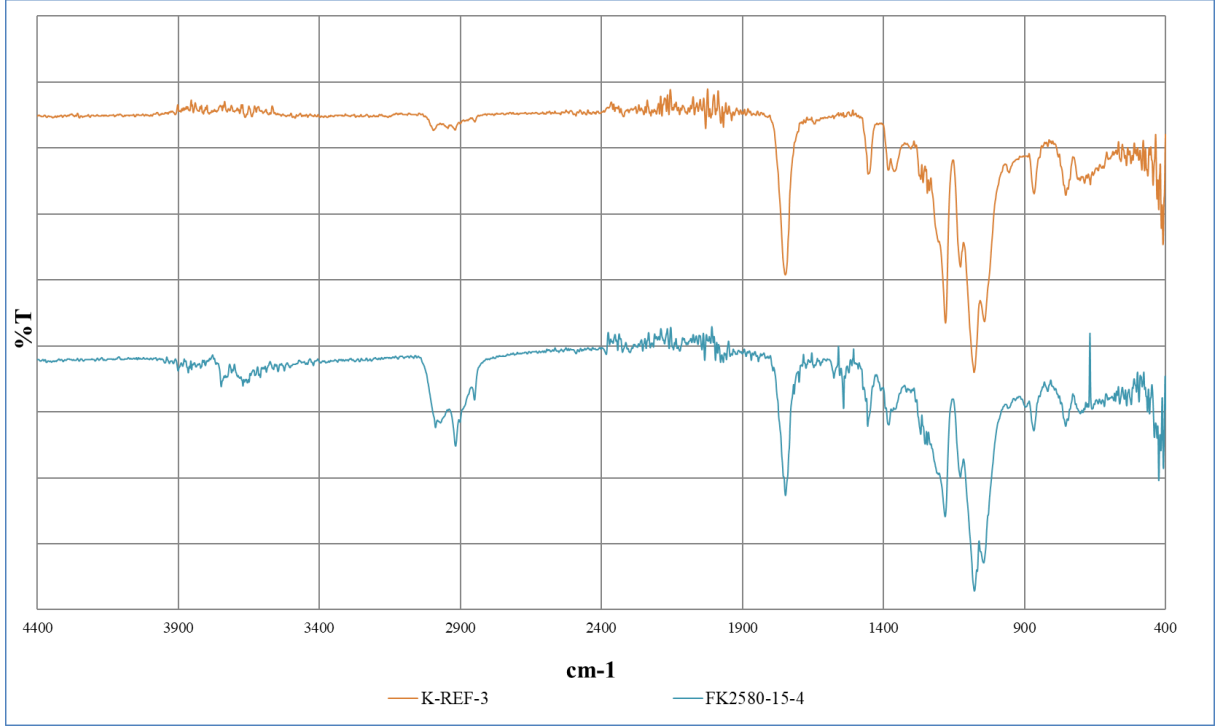
Şekil 9'daki 1. ve 2. görüntüler referans standart çekme numunesinin yüzeylerini, Şekil 13'teki 1. ve 2. görüntüler ise şartlandırılmış standart çekme numunesinin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde referans ve şartlandırılmış numune yüzeylerinin benzerliği görülmektedir. Şartlandırmanın numunenin yüzey kalitesi üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmamıştır. Her iki yüzey de düzgündür ve filamentler birbirine yapışmıştır.

3.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA filamentini nemli ortamda bekletmenin üretilen standart çekme numunelerine etkisinin incelenmesi için referans ve nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentten basılan standart çekme numunesine FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 14).

Şekil 14'teki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1} 'de; C-O gerilme bantları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1} 'de; C-H bandı 1361 cm^{-1} 'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1} ; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1} 'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1} 'de görülmektedir [20].

Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3750 cm^{-1} 'de görülmektedir (Şekil 14).

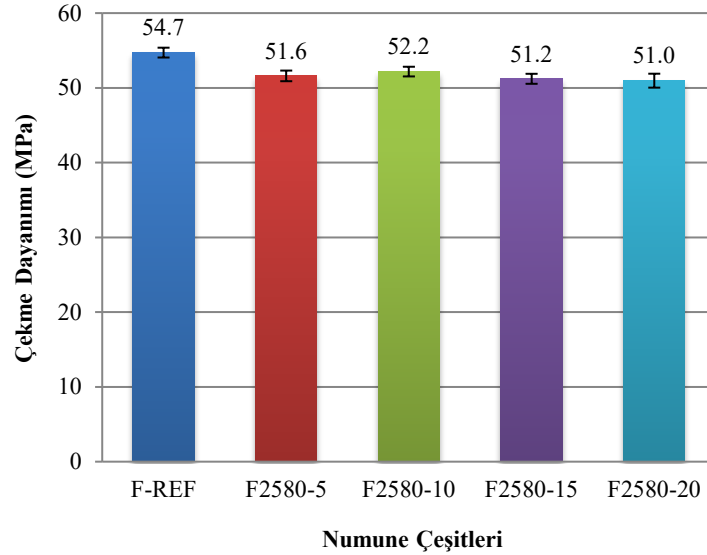


Şekil 14. Referans, nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinin FTIR analizleri.

4. SONUÇLAR

Tüm filament numunelere ait çekme dayanımları Şekil 15'teki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Şartlandırılmış tüm filament

numunelerin çekme dayanımları bekletme gün sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş filamentte gerçekleşmiştir.



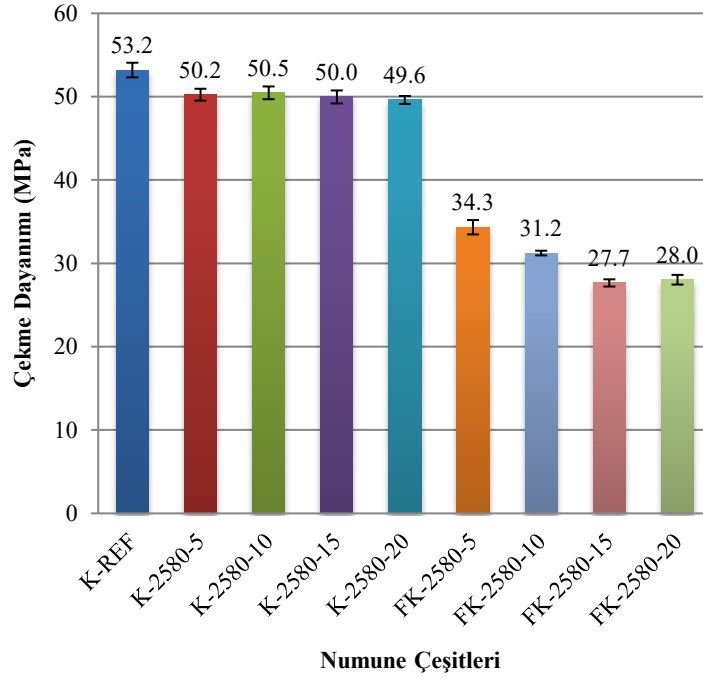
Şekil 15. Referans ve şartlandırılmış filament numunelerin çekme dayanımları.

Tüm şartlandırılmış standart çekme numunelerine ve şartlandırılmış filamentten üretilen standart çekme numunelerine ait çekme dayanımları Şekil 16'daki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Şartlandırılmış PLA filamentten yazdırılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları ve baskı kaliteleri bekletme gün

sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü 15 gün süre ile şartlandırılmış filamentten yazdırılan standart çekme numunesinde gerçekleşmiştir. Şartlandırılmamış filamentten yazdırılıp daha sonra şartlandırılmış standart çekme numuneleri birbirlerine hem yüzey olarak hem

de çekme dayanımları olarak benzer sonuçlar sergilemişlerdir. Tüm deneysel sonuçlar incelendiğinde nemli ortama maruz kalmış filamentlerden yapılan numune baskılarında

baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azalmasında numunelerin basıldıktan sonra nemli ortama maruz kalmasına kıyasla çok daha etkili olduğu bulunmuştur.



Şekil 16. Referans ve şartlandırılmış filamentten basılan tüm standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.

Nemli ortama farklı sürelerde maruz bırakılan PLA filamentin ve bu filamentlerden basılan standart çekme numunelerinin mekanik ve baskı özelliklerinin nasıl değiştiğinin belirlenmesi için yapılan bu araştırma sonucunda;

1. Nemli ortama maruz kalmış PLA filamentten yapılan 3B baskılarda baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

2. Standart çekme numunelerinin baskı kaliteleri ve çekme dayanımlarındaki en büyük düşüş 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentlerden üretilen standart çekme numunelerinde görülmüştür.

3. PLA filamentten basılmış standart çekme numunelerinin nemli ortama maruz kalmaları sonucu yüzey özelliklerinde ve çekme dayanımlarında önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.

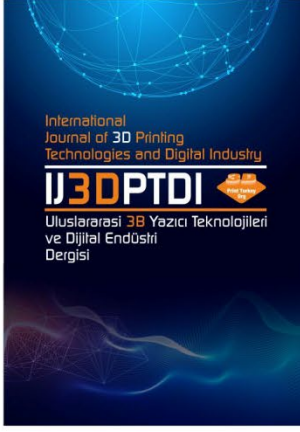
4. Nemli ortama maruz kalmış PLA filamentlerin yazdırılması esnasında filamentlerin birbirine yapışmaması gibi baskı problemleri ile karşılaşılabilir.

PLA filament ve filament ürünlerinin nemli ortamlardan fiziksel ve kimyasal olarak nasıl etkilendiği amacı ile yapılan bu çalışmada; filamentin 25 °C sıcaklık ve % 80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmesinden sonra yazdırılan standart çekme numunelerinde en büyük dayanım düşüşü görülmüştür. Filamentlerde ve şartlandırılmamış filamentten basılan standart çekme numunelerinde nemli ortamın etkisi fazla olmamıştır. Bu sebeple ülkemiz nem koşullarının PLA veya kompozit türevlerinden üretilecek filamentlerin yazdırma özelliklerine etkisinin araştırılması için yapılacak sonraki çalışmalarda deneysel koşullar olarak 25 °C sıcaklık, %80 bağıl nemli ortam ve 15 günlük bekletme süresinin kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar akademik araştırmalara ve endüstriyel olarak filament üretimi yapan firmaların ürünlerine katkı sağlayacak niteliktedir. Farklı parametreler ve burada araştırma kapsamı dışında bırakılmış filamentler ve filamentlerden elde edilen ürünler ile yapılacak akademik çalışmalar endüstriyel ürünlerin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Baran, E.H., Erbil, H.Y., "Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review", *Colloids and Interfaces*, Vol. 3, Issue 2, Page 43, 2019.
2. Musa, L., Kumar, N.K., Rahim, S.Z.A., Rasidi, M.S.M., Rennie, A.E.W., Rahman, R., Kanani, A. Y., Azmi, A.A., "A review on the potential of polylactic acid based thermoplastic elastomer as filament material for fused deposition modelling" *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 20, Pages 2841-2858, 2022.
3. Lopes, M.S., Jardini, A.L., Filho, R.M., "Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications", *Procedia Engineering*, Vol. 42, Pages 1402-1413, 2012.
4. Low, Z., Chua, Y.T., Ray, B.M., Mattia, D., Metcalfe, I.S., Patterson, D.A., "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques", *Journal of Membrane Science*, Vol. 523, Pages 596-613, 2017.
5. Savini, A., Savini, G.G., "A short history of 3D printing, a technological revolution just started", 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference, Pages 1-8, Tel-Aviv, 2015.
6. Atakok, G., Kam, M., Koc, H.B., "Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 18, Pages 1542-1554, 2022.
7. Lohar, D.V., Nikalje, A.M., Damle, P.G., "Development and testing of hybrid green polymer composite (HGPC) filaments of PLA reinforced with waste bio fillers", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 62, Part 2, Pages 818-824, 2022.
8. Allthat3d, "18 3D Printer Filament Types And Uses Comparison Guide", <https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament>, November 15, 2021.
9. All3dp, "The 7 Main Types of 3D Printing Technology in 2022", <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology>, November 15, 2021.
10. Martin, "3D Printer Filament Types | Properties, Uses & Comparison", <https://the3dprinterbee.com/3d-printing-filament-guide-properties-uses>, November 15, 2021.
11. MatterHackers, "3d Printer Filament Comparison Guide", <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>, November 15, 2021.
12. 3dinsider, "16 Different Types of 3D Printing Materials", <https://3dinsider.com/3d-printing-materials>, November 15, 2021.
13. Kalinke C., Oliveira, P.R., Neumsteir, N.V., Henriques, B.F., Aparecido, G.O., Loureiro, H.C., Janegitz, B.C., Bonacin, J.A., "Influence of filament aging and conductive additive in 3D printed sensors", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 1191, Page 339228, 2022.
14. Harris, A.M., Lee, E.C., "Heat and Humidity Performance of Injection Molded PLA for Durable Applications" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, Issue 3, Pages 1380-1389, 2010.
15. Porfyrus, A., Vasilakos, S., Zotiadis, C., Papaspyrides, C., Moser, K., Schueren, L., Buyle, G., Pavlidou, S., Vouyiouka, S., "Accelerated ageing and hydrolytic stabilization of poly(lactic acid) (PLA) under humidity and temperature conditioning" *Polymer Testing*, Vol. 68, Pages 315-332, 2018.
16. Kamau-Devers, K., Kortum, Z., Miller, S.A., "Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid) (PLA) wood polymer composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance", *Construction and Building Materials*, Vol. 214, Pages 290-302, 2019.
17. Sajna, V., Nayak, S.K., Mohanty, S., "Weathering and Biodegradation Study on Graft Copolymer Compatibilized Hybrid Bionanocomposites of Poly(Lactic Acid)", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, Pages 2895–2906, 2016.
18. ASTM Standard D638-14, "Standard test method for tensile properties of plastics", 2014.
19. Letcher, T., Waytashek, M., "Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Montreal, 2014.
20. Przekop, R.E., Kujawa, M., Pawlak, W., Dobrosielska, M., Sztorch, B., Wieleba, W., "Graphite Modified Polylactide (PLA) for 3D Printed (FDM/FFF) Sliding Elements" *Polymers*, Vol. 12(6):1250, Pages 1-22, 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>

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA DOLGU MALZEMELERİNİN BAĞLANTI MUKAVEMETİNE ETKİSİ

EFFECT OF FILLING MATERIALS ON JOINT
STRENGTH IN BONDED JOINTS

Yazarlar (Authors): Oğuz Koçar , Nergizhan Anaç , Baki Hazer 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koçar O., Anaç N., Hazer B., “Yapıştırma Bağlantılarında Dolgu Malzemelerinin Bağlantı Mukavemetine Etkisi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 220-232, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1275235

Araştırma Makale/ Research Article

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

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA DOLGU MALZEMELERİNİN BAĞLANTI MUKAVEMETİNE ETKİSİ

Oğuz Koçar^a, Nergizhan Anaç^{a*}, Baki Hazer^{b,c}

^a Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, TÜRKİYE

^b Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Kapadokya Üniversitesi, TÜRKİYE

^c Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, TÜRKİYE

*Sorumlu Yazar: nergizhan.kavak@beun.edu.tr

(Received: 01.04.23; Revised: 13.06.23; Accepted: 03.08.23)

ÖZ

Yapıştırma; iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesinde vida, perçin gibi mekanik eleman ihtiyacı olmadan, yapıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen bir işlemdir. Yapıştırma bağlantılarında çoğunlukla mukavemetin yüksek olması istenir ve bu beklenti yapıştırıcı malzeme seçimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bağlantıların mekanik dayanımlarının artması için yapıştırıcıya dolgu maddeleri eklenebilmektedir. Bazı üreticiler ticari yapıştırıcılarının formüllerine gümüş, bakır, çelik, titanyum, alüminyum, bronz gibi metal veya alümina oksit gibi seramik esaslı partiküller eklemiştir. Bununla birlikte; dolgu maddeleri eklenerek yapıştırıcıların güçlendirilmesi konusu, gelişen yeni teknolojik malzemeler sayesinde araştırmacıların çalışmalarına devam ettiği bir alandır. Bu çalışmada 3B yazıcı ile PLA Plus filamentten üretilen farklı doluluk oranlarındaki parçalar (%20 ve %100) 2 farklı ticari (Araldite 2015, Loctite 9466) ve 2 farklı ticari olmayan yapıştırıcı (PVC esaslı ve PS-Th esaslı yapıştırıcı) kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yapıştırıcılar içerisine ağırlıkça %5 oranında iki farklı dolgu malzemesi (44~100 µm yumuşak lehim tozu, 45 µm fındık kabuğu tozu) ilave edilmiştir. Yapıştırma işlemi sonrasında bağlantıların mekanik özellikleri incelenmiştir. %100 dolu bağlantılarda Loctite 9466 yapıştırıcı içine %5 lehim ve fındık kabuğu tozu katkısı, bağlantı mukavemet değerini arttırmıştır. %20 dolu bağlantılarda ise yapıştırıcıya dolgu malzemesi eklenmesinin mukavemeti olumsuz etkilediği görülmüştür. Yapıştırılan parçaların doluluk oranları, yapıştırıcı malzemenin sade veya katkı eklenerek kullanılması gibi değişkenlerin bağlantı mukavemetini oldukça etkilediği anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, 3B baskı, Yapıştırma işlemi, Katkılı yapıştırıcı, Tekli bindirme bağlantısı.

EFFECT OF FILLING MATERIALS ON JOINT STRENGTH IN BONDED JOINTS

ABSTRACT

Adhesive bonding is a process of using adhesive to join two or more parts without needing mechanical fasteners, such as screws and rivets. Adhesive joints are desired for high strength, and this expectation is one of the most critical factors affecting the choice of adhesive. Fillers can be added to the adhesive to increase the mechanical strength of the joints. Some manufacturers have added metal-based particles such as silver, copper, steel, titanium, titanium, aluminum, and bronze or ceramic-based particles such as alumina oxide to the formulas of their commercial adhesives. However, strengthening adhesives by adding fillers is an area where researchers continue to work thanks to new technological materials.

In this study, parts with different filling ratios (20% and 100%) produced from PLA Plus filament with a 3D printer were joined using two different commercial adhesives (Araldite 2015, Loctite 9466) and two different non-commercial adhesives (PVC-based and PS-Th-based adhesive). Two different fillers (44~100 µm soft solder powder and 45 µm hazelnut shell powder) were added to these adhesives at a

rate of 5 wt%. The mechanical properties of the joints were examined after the adhesive bonding process. Solder and hazelnut shell powder (5%) additive in Loctite 9466 adhesive increased the joint strength value in infill ratio 100% joints. In the case of 20% infill ratio joints, it was observed that the addition of filler material to the adhesive negatively affected the strength. It is understood that variables such as the filling ratios of the bonded parts, and the use of the adhesive material plain or with additives affect the joint strength considerably.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Printing, Adhesive Bonding, Filled Adhesive, Single Lap Joint.

1. GİRİŞ

Yapıştırma; malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Yapıştırma işleminde ilk girdi; yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemelerdir. Yapıştırma işlemi; bu girdilerin yanı sıra yüzey hazırlama işlemlerinden, çalışma şartlarından ve uygulayıcının yetkinliğinden etkilenir. İnsanoğlu geçmişten günümüze kadarki süre zarfında, doğal kaynaklardan elde edilen yapıştırıcılardan laboratuvarında üretilen yapay yapıştırıcı formüllere geçiş yapmıştır. Bununla birlikte, teknolojinin ilerlemesiyle yeni malzeme ihtiyacının artması, bu malzemelerin birleştirilmesi için yeni nesil yapıştırıcıların geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Örneğin, endüstride çok kullanılan epoksi yapıştırıcıların tokluğu ve çatlak ilerlemesine direnci yüksek değildir [1-3]. Bu nedenle epoksi yapıştırıcıların yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak uygulamaları kısıtlanmaktadır. Üreticiler bu tarz sorunları yapıştırıcının kimyasını değiştirerek aşmaya çalışmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının performansını (dayanımını) artırmak ve kullanım alanlarını genişletmek için araştırmalar halen devam etmekle birlikte bazı uygulamalar da [4] bulunmaktadır. Bu uygulamalardan biri, yapıştırıcı içerisine çeşitli dolgu maddelerinin eklenmesidir. Bu yaklaşım, aynı zamanda maliyeti azaltma avantajı da sağlamaktadır. Dolgu maddeleri olarak genellikle uçucu olmayan, yapışkan olmayan ve yapıştırıcılarda çözünmeyen lignoselülozik veya inorganik parçacıklar kullanılır [5]. Dolgu malzemeleri, kimyasal yapılarına göre organik veya inorganik maddeler olmak üzere ikiye ayrılır [6-7] İnorganik dolgu maddeleri olarak silikon, kalsiyum, kaolin, talk, vb. sayılabilir. Nanoselüloz, organik ve doğal bir takviye maddesidir. Pirinç kabuğu, hindistancevizi kültü, odun unu, jüt, hindistan cevizi elyafı, kenevir, sisal, muz, bambu and palm çekirdeği kabuğu kullanılan diğer organik dolgu malzemeleridir [8-10].

Yapıştırıcılara katılan dolgu malzemelerine, cam/karbon fiberler [11-13], polimer [14-16], metal/seramik tozları [17-20] örnek olarak verilebilir. Yapıştırıcıya ilave edilen dolgu maddesinin türü, miktarı ve boyutu, yapıştırıcının özelliklerini (yoğunluk, sertlik, çekme, basma ve kayma gerilmesini) etkiler [21-25]. Bu etkileşim, bazen dolgu maddesi ile yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağın oluşmasıyla bazen de dolgu maddesinin kapladığı hacim sayesinde olabilmektedir [26]. Literatür incelendiğinde, dolgu maddesi kullanımındaki genel eğilimin, nano ve mikro boyutta tozlar veya fiberler/lifler yönünde olduğu görülmektedir [27-31]. Nano tozların veya nano liflerin yüzey özellikleri (boyut ve şekil), içinde buldukları yapının temel özelliklerini değiştirmede etkilidir [4, 19]. Nano toz ve liflerin yüzey/hacim oranlarının yüksek olması eklendiği yapıya daha yüksek mekanik, manyetik, termal ve elektriksel özellikler kazandırabilmektedir. Nanoliflerin boyutlarının küçük olması yüzünden yapısal kusurları daha az olduğu için mekanik özellikleri çok daha iyidir [32].

Parçacık boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğu bilinmektedir [33-34]. Mikro ölçekli parçacıkların, nano ölçekli muadili ile değiştirilmesinin yüksek katılık ve akma mukavemeti sağladığı görülmüştür [35]. Polimerlerde bulunan mikro boyutlu parçalar çatlak başlangıç noktası olabilir ve stres konsantrasyonlarını indükleyebilir [36]. Nanoparçacık kullanımı, yapıştırma bölgesinde ince yapıştırma kalınlığına olanak sağlar [37]. Bu nedenler, mikro yerine nano boyutlu parçacıkların tercih edilir olmasını sağlamıştır. Fakat nano dolgu malzemesinin üretilmesi ve kullanılması hem zahmetli hem de maliyetli bir süreçtir. Nano tozların yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri geliştirilmesi

mümkün olsa da uygulamanın dikkat istemesi, işlemi zorlaştırmaktadır. Ayrıca nano tozların epoksi matriste dağılımında homojenliğin sağlanması, mikro boyuttaki tozlara kıyasla çok daha zordur [38] ve topaklanma (agregasyon/aglomerasyon) problemleri daha fazladır [39]. Topaklanma durumu, üstün ve gelişmiş özelliklerin elde edilmesini, dolayısıyla nanoyapılı malzemelerin çeşitli uygulamalarda kullanılmasını engeller. Ayrıca nanokompozitlerde, yapının özelliklerini bozan birçok kusur ve istenmeyen gerilme konsantrasyonu üretebilir [40].

Metal malzemelerin yapıştırılması işleminde, yapıştırıcılara eklenen metal veya organik katkıların (mikro veya nano) bağlantının yapıştırma mukavemetini artırdığı bilinmektedir [41-43]. Mikro boyutta tozların dolgu malzemesi olarak yapıştırıcıya eklenmesi, nano tozlara göre daha basittir. Mikro tozların maliyeti uygun, üretilmesi ve temini kolaydır. Yeşil ekonomi, yeşil kimya ve sürdürülebilir ekonomi odağında, özellikle, atık malzemelerden veya yan ürünlerinden oluşan doğal dolgu malzemeleri geliştirme eğilimi artmıştır [44]. Bu eğilim, doğal dolgu malzemelerinin mikro toz olarak kullanılmasını destekleyecek yöndedir. Kaynakların kullanımında israfın azaltılması ve sürdürülebilir üretim kavramı 4. Sanayi devrimi olarak da adlandırılan Endüstri 4.0'la birlikte oldukça önemli hale gelmiştir. Üretim sektöründe eklemeli imalat veya katmanlı imalat adı verilen yenilikçi bir yöntem kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem; üretimde atık miktarının azalmasının yanı sıra, sürdürülebilir malzemelerin kullanımına olanak sağlamasıyla karbon ayak izlerinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır [45]. Ayrıca, ağırlık ve enerji tasarrufu gibi teknolojik faydaları da bulunmaktadır.

Bu yöntem sayesinde, geleneksel yöntemlerle üretilmede zorluk yaşanan parçaların üretilmesi sağlanmıştır. Yöntemin popülaritesini arttıran araçlardan biri 3B yazıcıdır. 3B yazıcılar, Endüstri 4.0 konseptinin uygulanmasında hayati bir rol oynamaktadır [46]. 3B yazıcılarda kullanılan ana malzeme, termoplastik filamentlerdir. Plastik malzemeler çevre sorunu olarak nitelendirilseler de hala çeşitli sanayi dallarında ve gündelik yaşantımızda vazgeçilmezdir. Yazıcılarda üretim gerçekleştirilmesinin maliyet ve zaman açısından

avantajları bulunmasına rağmen, üretilen parçalardaki boyutlar yazıcının tabla boyutları yüzünden sınırlıdır. Sanayide, üretilen parçaların birleştirilmesiyle ana parçanın oluşturulması gereken pek çok durum vardır. Bu nedenle büyük boyutlu parçalar için, küçük parçaların birbirine monte edilmesi yöntemi benimsenmektedir. Termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde, parça görünümüne (estetik olarak) zarar vermeyecek hem pratik hem de hızlı bir teknik kullanılması gereklidir. Geleneksel birleştirme yöntemlerinden olan yapıştırma işlemi, 3B yazıcılarda üretilen parçalarda kullanmak için uygulanabilir yöntemlerden biri olarak ön plana çıkmaktadır. 3B yazıcıdan çıkan parçaların yapıştırılması hakkında bazı çalışmalar vardır. Plastik malzemelerin yapıştırılması konusunda ise, toz katkılı yapıştırıcıların bağlantı dayanımına etkilerinin incelendiği bir çalışma yoktur. Bu çalışmada, 3B yazıcıda basılan parçaların birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcıların toz katkısı ile güçlendirilmesi yöntemi üzerinde çalışılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş plastik esaslı malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi işleminde, malzeme doluluk oranı ve yapıştırıcı çeşidine (katkısız/sade ve katkılı yapıştırıcı) bağlı olarak oluşturulan bağlantıların dayanımını incelemektir. Eklemeli imalat baskı parametrelerinden, iki farklı malzeme doluluk oranı (%20 ve %100) ve yapıştırma parametrelerinden, iki farklı ticari (Araldite 2015, Loctite 9466) ve iki farklı ticari olmayan yapıştırıcı (PVC ve PS-Th esaslı yapıştırıcı), mekanik yüzey hazırlama (240 SiC) ile metal klips kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, 3B yazıcı ile üretilen malzemelerin yapıştırıcıyla birleştirilmesinde önemli parametrelerden biri olan yapıştırıcı çeşidi ile yapıştırıcıya eklenen dolgu malzemesi etkisinin anlaşılmasında ve işlem için uygun şartların belirlenmesinde literatüre katkıda bulunacaktır.

2. DENEYSEL PROSEDÜR

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Yapılan çalışmada dört farklı yapıştırıcı (PS-Th ve PVC esaslı, Araldite 2015, Loctite 9466), iki farklı doluluk oranında (% 20 ve %100) PLA Plus plakalar kullanılmıştır. Yapıştırıcı içine 5% lehim ve fındık kabuğu tozu katılmış ve tozların yapıştırma dayanımına etkileri incelenmiştir. PLA Plus filamentin (1.75 mm

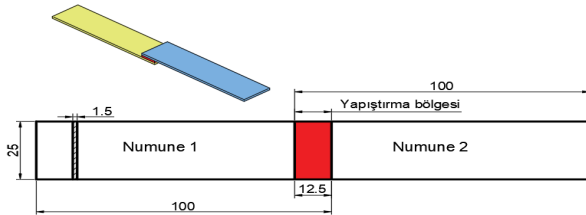
çapında ESUN marka) mekanik özellikleri Çizelge 1’de, numunelerin hazırlanmasında kullanılan baskı parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir. Numunelerin üretilmesinde Ender S-1 3B yazıcı kullanılmıştır. Deneylerde PLA Plus malzemenin mekanik özelliklerinin belirlemek için %20 ve %100 doluluk oranlarında ASTM D608-10 [47] standartlarına uygun çekme test numuneleri, sonra yapıştırma bağlantıları için 25*100*1.5 mm plakalar (Şekil 1) hazırlanmıştır.

Çizelge 1. PLA Plus malzemesinin teknik özellikleri [48].

Mekanik Özellikler	PLA Plus
Filament Çapı (mm)	1.75
Renk	Siyah
Çekme Dayanımı (MPa)	63
Kopma Uzaması (%)	20
Yoğunluk (g/cm ³)	1.23
Erime Noktası (°C)	205-225

Çizelge 2. 3B yazıcı baskı parametreleri.

Doluluk Oranı	Katman Kalınlığı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı	Basma Hızı
20%				
100%	0.2 mm	210 °C	55 °C	50 mm/s



Şekil 1. Tekli bindirme bağlantısı ölçüleri.

2.2. Yapıştırıcı özellikleri

Çalışmada iki farklı ticari yapıştırıcı (Araldite 2015 ve Loctite 9466) ve iki farklı ticari olmayan (PVC esaslı ve PS-Th esaslı) laboratuvar ortamında üretilen yapıştırıcı olmak üzere dört yapıştırıcı kullanılmıştır. Araldite 2015; çok amaçlı, iki bileşenli, oda sıcaklığında kürlen, yüksek mukavemetli, korozyon direnci yüksek bir epoksi yapıştırıcıdır [49-50]. Loctite 9466 güçlendirilmiş bir 2K-Epoksi yapıştırıcı olup, uzun çalışma süresi ve yüksek yapışma mukavemeti sağlayan epoksi bazlı bir yapıştırıcıdır [51-53]. Metal, seramik ve

plastikler olmak üzere birçok uygulama alanına sahiptir. Çizelge 3’te Araldite 2015 ve Loctite 9466 yapıştırıcıların mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. Araldite 2015 ve Loctite 9466 mekanik özellikleri

	Araldite 2015 [54]	Loctite 9466 [55]
Elastisite modülü (MPa)	1850	1718
Çekme gerilmesi (MPa)	21.6	32
Poisson oranı	0.33	0.33
Çekme akma gerilmesi (MPa)	12.6	-
Uzama %	4.2	3
Shore D sertlik	-	60

PS-Th (polistiren) ve PVC (polivinil klorür) esaslı yapıştırıcılar, sırasıyla Toluen ve Tetrahidrofur (THF) çözücüler kullanılarak hazırlanmıştır. Polistiren ile PVC’nin mekanik özellikleri ve çözelti içindeki ağırlıkça oranları Çizelge 4’te verilmiştir.

PVC kütlelerinin %57’si klordan oluşan bir termoplastik malzemedir. PVC, dayanıklılığı ve ekonomik olması nedeniyle en çok kullanılan plastik malzemelerden birisidir [56-57]. Polistiren araştırmalarda yaygın olarak kullanılan ve üretim ölçeği yıllık birkaç milyon tonu bulan plastiklerdendir [58-59]. Kullanım alanlarının başında kaplar, kapaklar, şişeler, tepsiler, bardaklar ve tek kullanımlık çatal, bıçak takımı gelmektedir [60]. Termoplastik bir polimer olan polistiren oda sıcaklığında katı (camsı) haldedir ancak camsı geçiş sıcaklığı olan yaklaşık 100 °C’ nin üzerinde ısıtıldığında akar. Soğutulduğunda tekrar sertleşir. Bu sıcaklık davranışı ekstrüzyon (straforda olduğu gibi) ve ayrıca kalıplama ve vakumla şekillendirme için kullanılır, çünkü ince detaylı kalıplara dökülebilir.

Çözücülerden THF, çok çeşitli polar ve polar olmayan bileşenleri çözen heterosiklik organik ve polar aprotik bir çözücüdür [61]. THF’nin uçucu karakterinden dolayı, hazırlanan yapıştırıcı uygulandıktan sonra kolayca uçabilmekte ve bağlantı bölgesinde diğer maddeler kalmaktadır [62]. PVC, THF çözücünde iyi çözünür ve yapıştırıcı uygulandıktan sonra hızlı uçucu olarak yapışma işlemini tamamlar. PS-Th deki Toluen çözücü,

yapışma sürecinde THF den daha geç buharlaşır ve yapışma biraz daha geç tamamlanır.

Çizelge 4. PS-Th ve PVC yapıştırıcıların mekanik özellikleri.

	Çekme gerilmesi (MPa)	Uzama	Çözücü	Ağırlık (gr)	Moleküler Ağırlık		
					Mn (kDa)	Mw (kPa)	PDI
PS-Th	13.09	10.5	Toluen	15/85	120	201	1.67
PVC	40.36	14.12	THF	10/90	84	174	2.07

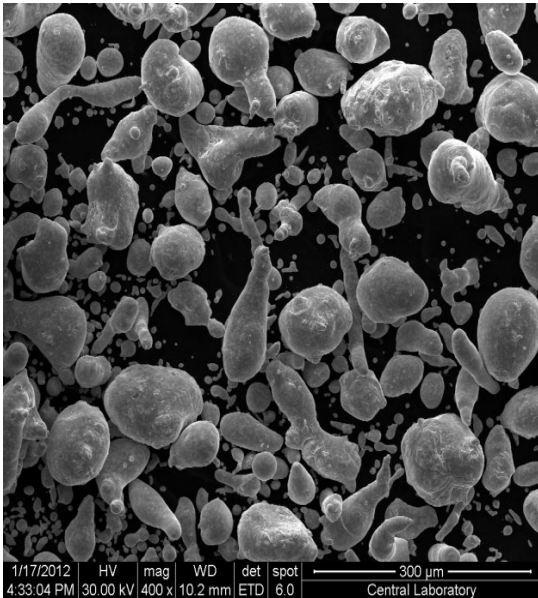
2.3 Dolgu Malzemeleri

Yapıştırıcılara eklenen yumuşak lehim tozu, 44-100 µm boyutlarında ve 63Sn37Pb-ötektik malzemedir. %63 kalay ve %37 kurşundan oluşan ve erime noktası 183°C olan bir alaşımdır. Şekil 2 (a)'da lehim tozu SEM görüntüsü ve (b)'de EDX analizi bulunmaktadır. Yumuşak lehim tozunun şeklinin yuvarlağa yakın fakat düzensiz olduğu, tozun kurşun ve kalay elementlerinden oluştuğu görülmektedir.

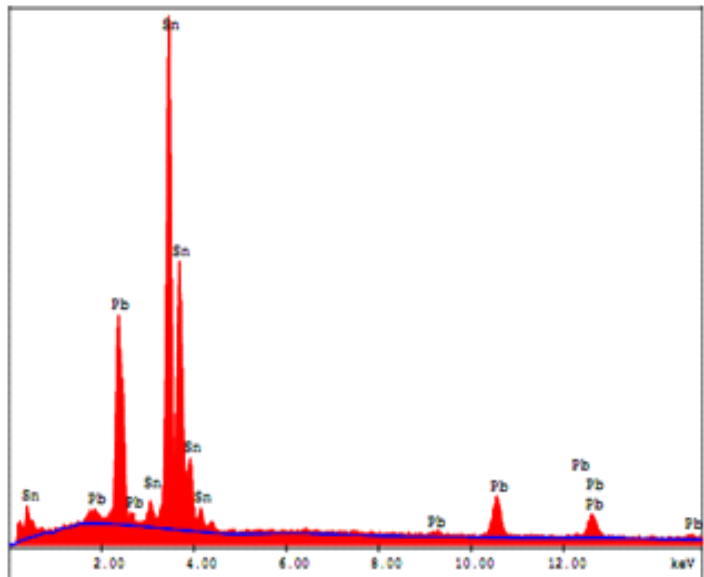
Fındık kabuğu tozu, fındık kabuklarından elde edilmiştir. Fındık kabukları, fırında kurutulduktan sonra halkalı değirmende öğütülmüş ve elek sarsma makinasında elenerek, boyutu 45 µm olan tozlar ayrılmıştır.

Yapılan çalışmada, fındık kabuğu tozu ve lehim tozu ağırlıkça %5 oranında yapıştırıcıya eklenmiştir. Deneylerde eklenen tozların boyut farklılıklarından kaynaklanabilecek problemleri ortadan kaldırmak için mümkün mertebe yakın boyutlarda tozlar kullanmaya özen gösterilmiştir. Lehim tozunun yoğunluğu 7.31 g/cm³ ve fındık kabuğu tozunun yoğunluğu 0,7240 g/cm³'tür.

Fındık kabuğu tozunun kırılğan yapısından dolayı farklı geometrilere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.a). Fındık kabuğu tozlarının element analizlerinde (Şekil 3.b), karbon ve oksijen elementlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.'te fındık kabuğu tozu FTIR analizi sonuçları verilmiştir.

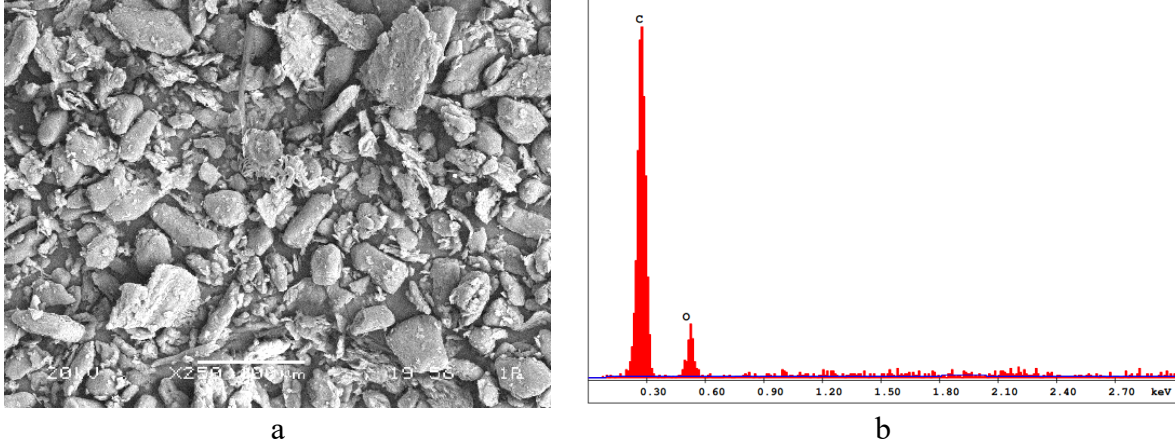


a



b

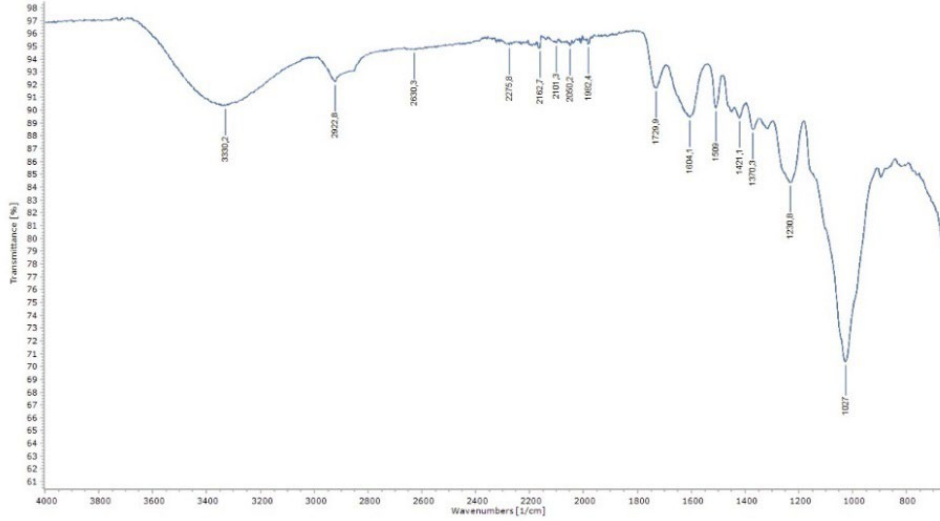
Şekil 2. Yumuşak lehim tozunun (a) SEM görüntüsü, (b) EDX analiz.



Şekil 3. Fındık kabuğu tozunun (a) SEM görüntüsü, (b) EDX analiz.

Fındık organik yapıdadır, -OH ve -CH grupları gözlenir (3330 cm^{-1} OH ve 2923 cm^{-1} CH). Aynı şekilde organik yapılarda da $1604'$ lerde alken

grupları (C=C), $1231'$ lerde amin grupları ve $1027'$ lerde alifatik CO grupları görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Fındık kabuğu tozu FTIR analizi.

2.4. Yapıştırma Parametreleri

Şekil 1'de tekli bindirme bağlantısının görünüşü verilmiştir. Eriyik biriktirme yöntemiyle üretilen parçaların yapıştırma performansını incelemek için parçaların doluluk oranı (%20 ve %100), yüzey hazırlığı için 240 SiC zımpara kullanılarak yapıştırma gerçekleştirilmiştir. Belirlenen parametrelere göre deney tasarımı Çizelge 5'de verilmiştir. 3B yazıcıdan elde edilen plakalardan, yapıştırma bağlantıları oluşturabilmek için ilk olarak yüzey hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcının temas edeceği yüzeylerin pürüzlendirilmesi için mekanik aşındırma

yöntemi 240 SiC zımpara kullanılmıştır. Zımparalama işlemi sırasında yapıştırma bölgesinde parça eksenine dik ve yatay olarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi yapıştırma yüzeyinin hepsini kapsayacak şekilde yapılmıştır. Yapıştırılan numuneler bindirme bölgesinde, metal kağıt klips sıkıştırma tipi ile basınç uygulamasına maruz bırakılmıştır. Aynı ortam şartlarında, yapıştırıcı üreticisinin tavsiyesine uygun şekilde kürlenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı kürlendikten sonra (24 saat) basınç ortadan kaldırılmış ve bağlantılar oluşturulmuştur.

Çizelge 5. Deneysel tasarımı

No	Malzeme	Yapıştırıcı	Doluluk oranı	Katkı Maddesi	Katkı oranı %	Yüzey hazırlama	Sıkıştırma tipi
1							
2		PS-Th					
3							
4			%20	Sade			
5		PVC			%0		
6	PLA Plus			Fındık		240 SiC	Klips
7			%100		%5		
8		Araldite 2015		Lehim			
9							
10							
11		Loctite 9466					
12							

2.5. Çekme testi

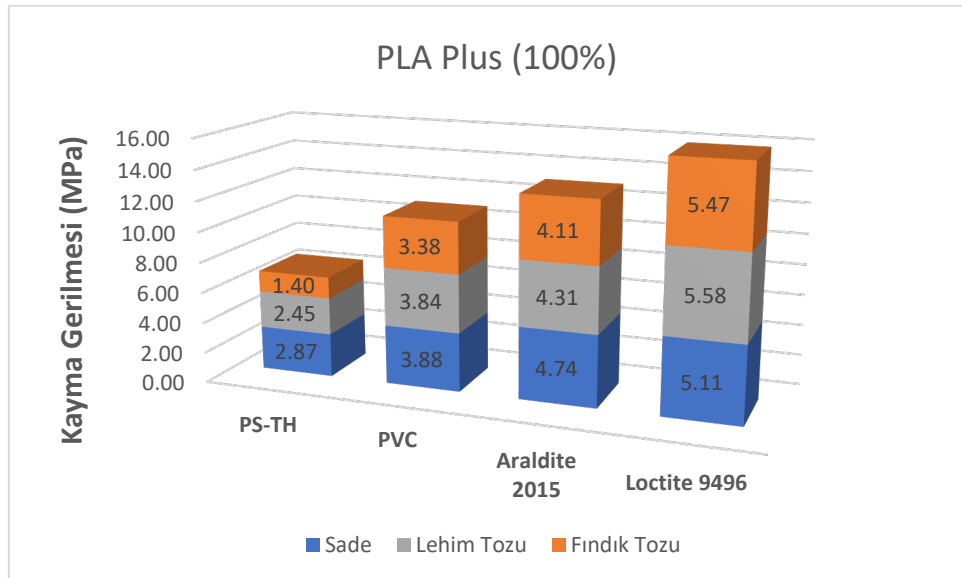
Yapıştırma bağlantısının mukavemetini belirlemek için çekme testleri, 5 KN kapasiteli WDW-5 model universal çekme cihazında, çekme hızı 1 mm/dk olarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler beş tekrarlı olarak yapılmış, sonuçların ortalaması alınmıştır.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1.Yapıştırma bağlantı mukavemetlerinin değerlendirilmesi

%100 doluluk oranında basılan parçalarla yapılan yapıştırma bağlantıları her durumda, %20 doluluk oranında basılan parçalarla yapılan yapıştırma bağlantılarından daha mukavemetli çıkmıştır. 3B yazıcılarda basılan parçaların doluluk oranı arttıkça, malzemenin mukavemetinin arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.'den görüldüğü üzere en yüksek çekme mukavemetini lehim tozu katkılı Loctite 9466

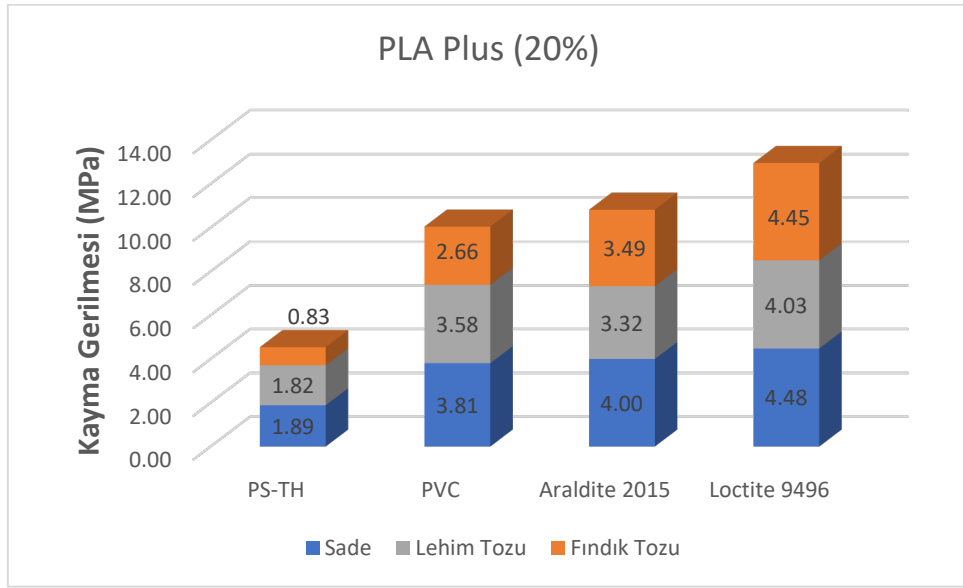
yapıştırıcı sağlamış olup, lehim tozunun sertliğinin yüksek olması sayesinde bağlantı mukavemetinde avantaj yakalanmıştır. Buna rağmen, Loctite 9466'e eklenen fındık kabuğu tozunun kırılabilirliği yüzünden mukavemet artışı lehim tozuyla elde edilene kıyasla biraz daha azdır. PS-Th, PVC ve Araldite 2015 yapıştırıcıların %5 fındık veya lehim tozu eklenmesiyle elde edilen mukavemet değerleri, sade hallerine kıyasla düşük çıkmıştır (Şekil 5). Loctite 9466'da ise %5 fındık veya %5 lehim tozu eklenmesi ile sade Loctite 9466'ya göre mukavemet yükselmiştir. %100 dolu parçalarda yapıştırma mukavemeti sade veya katkılı yapıştırıcıya bağlı olarak değerlendirildiğinde sıralama PS-Th<PVC<Araldite2015<Loctite 9466 olarak bulunmuştur. Şekil 6.'da ise görüldüğü üzere en yüksek çekme mukavemetini sade Loctite 9466 yapıştırıcı sağlamıştır.



Şekil 5. %100 doluluk oranına sahip bağlantılarda ortalama kayma gerilmeleri.

Şekil 6'da PS-Th, PVC, Araldite2015 ve Loctite 9466 yapıştırıcıların %5 fındık veya lehim tozu eklenmesiyle elde edilen mukavemet değerleri, sade olanlara kıyasla düşüktür. Bununla birlikte Araldite 2015 ve Loctite 9466 yapıştırıcılarda %5 lehim tozu eklenmesi ile oluşan mukavemetteki düşüş, %5 fındık kabuğu tozu eklenmesinden daha fazladır. PS-Th ve PVC yapıştırıcılarda %5 lehim tozu eklenmesi ile oluşan mukavemetteki düşüş, %5 fındık kabuğu tozu eklenmesinden daha azdır. %20

dolu parçalarda yapıştırma mukavemeti sade ve %5 fındık kabuğu tozu katkılı yapıştırıcıya bağlı olarak değerlendirildiğinde sıralama PS-Th<PVC<Araldite2015<Loctite 9466 olarak bulunmuştur. Lehim tozu katkısı eklendiğinde, PVC esaslı yapıştırıcı bağlantı mukavemeti lehim tozu katkılı Araldite2015'in bağlantı mukavemetinden bir miktar yüksek çıkmıştır. Şekil 5.ve Şekil 6.'da, en düşük bağlantı mukavemetini PS-Th Toluen çözücülü yapıştırıcının sağladığı görülmektedir



Şekil 6. %20 doluluk oranına sahip bağlantılarda ortalama kayma gerilmeleri

Araldite 2015 yapıştırıcı tiksotropik viskoziteye, Loctite 9466 yapıştırıcı ise orta seviye viskoziteye sahiptir. Dolgu maddeleri, yapıştırıcıların reolojik davranışını etkilemektedir [63]. Lehim tozunun içeriği, boyutu ve şeklide reolojiyi önemli ölçüde değiştirir [64]. Dolayısıyla, deneylerde kullanılan yapıştırıcıların reolojik davranışları birbirinden farklıdır.

Şekil 6.'da sade ve katkılı yapıştırma bağlantılarının tümünde mukavemet, %100 doluluk oranındaki eş bağlantılara kıyasla düşük çıkmıştır. Parça doluluk oranı azaldığında, yapıştırıcı içine eklenen toz cinsine bağlı olmaksızın bağlantı mukavemeti olumsuz etkilenmiştir.

%100 doluluk oranlarında üretilen parçalar, geleneksel yöntemlerle üretilen parça özelliklerine daha yakın olduğundan bu kıyaslamayla mekanik özellikleri değerlendirmek daha anlamlıdır. Doluluk oranı

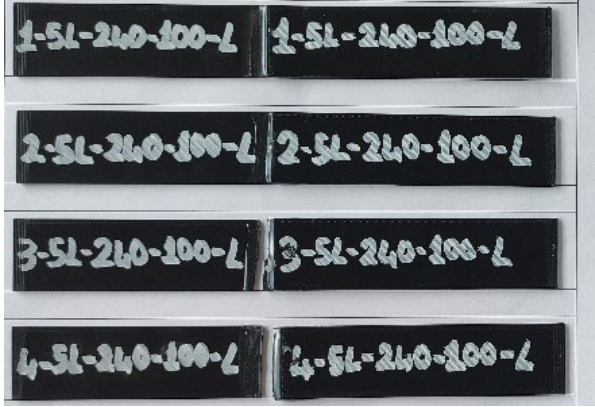
azaltılmış malzemeler için referans alınabilecek çalışma sonuçları sınırlıdır.

Yapıştırma bağlantıları için dolgu malzemesi seçiminde, bağlantı mukavemetleri kadar üretim maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Atık malzemelerin geri dönüştürülerek değerlendirilebileceği kullanım alanlarından biri, dolgu malzemeleri kategorisi olabilir. Bu çalışmada kullanılan lehim tozu, hem üretilmesindeki zorluk hem de yüksek maliyet açısından fındık kabuğu tozundan ayrılır. %100 dolu parçalarda en yüksek mukavemeti sağlayan Loctite 9466'ya lehim tozu ve fındık kabuğu tozu eklenmesiyle elde edilen sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Bunun gibi durumlarda, yapıştırma bağlantısının kullanılacağı yerdeki çalışma şartları göz önüne alınarak uygun dolgu malzemesi seçilmesi maliyeti azaltacaktır.

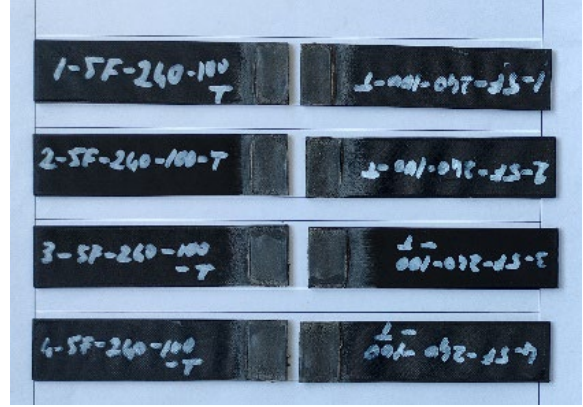
3.2. Kopma yüzeylerinin değerlendirilmesi

Çekme testi sonrası yapıştırıcı bağlantıların kopma yüzeylerinin görüntüleri alınarak hasar türleri incelenmiştir. Şekil 7’de %100 dolu

parçalarla yapılan en yüksek ve en düşük mukavemete sahip yapıştırma bağlantılarının kopma yüzeyleri gösterilmiştir.

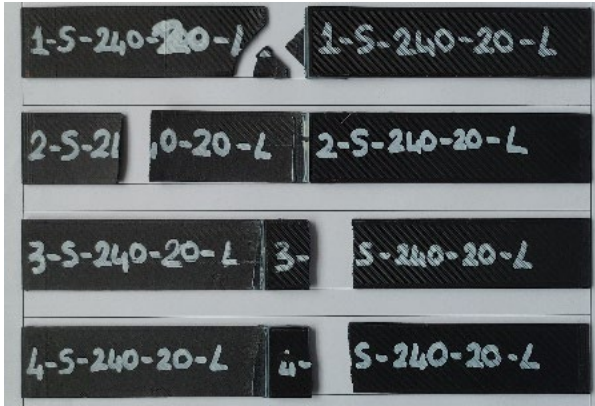


%5 lehim tozu katkılı Loctite 9466 (yüksek mukavemet)

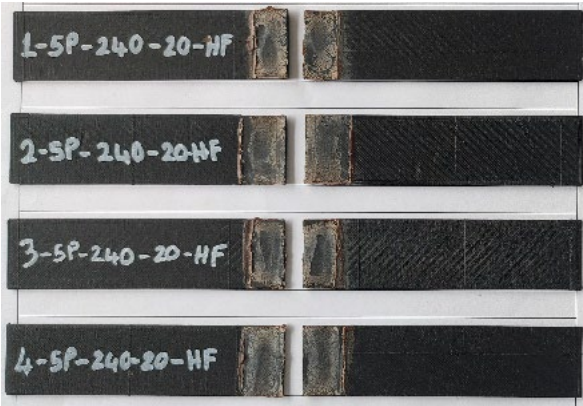


%5 fındık kabuğu tozu katkılı PS-Th (düşük mukavemet)

Şekil 7. %100 dolu parçalarda bağlantı kopma yüzeyleri



a) Sade Loctite 9466



b) %5 fındık kabuğu tozu katkılı PVC

Şekil 8. %20 dolu parçalarda bağlantı kopma yüzeyleri

%5 lehim tozu katkılı Loctite 9466 bağlantılarında kopma, yapışma bölgesinin sınırında ana malzemede gerçekleşmiştir. Tabaka kusuru adı verilen bu durum, yapıştırıcının mukavemeti parça mukavemetinden fazla ise meydana gelmektedir. Yapıştırıcı içine eklenen lehim tozunun şeklinin düzensiz olması, yapıştırıcıya tutunması için pozitif etki olmuştur.

Şekil 8 a)’da %20 dolu parçalar için en yüksek dayanıma sahip sade Loctite 9466 kullanılan bağlantılardaki tabaka kusuru görülmektedir. Şekil 8 b)’de ise %5 fındık kabuğu tozu katkılı PVC esaslı THF çözücü yapıştırıcıda karışık hasar (yapışma ve kohezyon hatası) olan numuneler verilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8’deki numune örneklerinden fındık kabuğu tozu

eklenmesiyle yapıştırıcı formülünün şeffaf olan rengini kahverengine, lehim tozu eklenmesiyle ise metalik gri renge dönüştürdüğü görülmektedir.

4. SONUÇLAR

- 3B yazıcıda üretilen parçalarda doluluk oranı azaldığında, parça mukavemeti azalmaktadır.
- Yapıştırma bağlantılarında en yüksek dayanımı Loctite 9466 yapıştırıcı, en düşük dayanımı ise PS-Th yapıştırıcı göstermiştir.
- Eklemeli imalatla üretilen parçalar değerlendirilirken, geleneksel yöntemlerle üretilen parçalar referans alınmaktadır. Bu nedenle 3B yazıcılarla üretilen parçalarda yapılan işlemlerin doluluk oranları dikkate alınarak yorumlanması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

- %100 doluluk için Loctite 9466 yapıştırıcı içine %5 lehim ve fındık kabuğu tozu katkısı, deneylerde tüm yapıştırıcılara kıyasla daha yüksek mukavemet sağlamıştır.
- %20 doluluk oranındaki parçalarla yapılan yapıştırma işleminde, yapıştırıcıya dolgu malzemesi eklemenin mukavemeti olumsuz etkilediği görülmüştür.
- Yapıştırıcı dolgu malzemesi seçiminde, mukavemetin yanı sıra maliyette göz önüne alınması toplam maliyeti azaltmak için önemlidir. Organik, atık malzemelerin katma değer yaratacak yapıştırıcı veya kompozit dolgu malzemeleri olarak kullanılmaları desteklenmelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kapadokya Üniversitesi Araştırmaları tarafından desteklenmiştir. (#KÜN.2020-BAGP-001).

KAYNAKLAR

- 1.Ghosh, P. and Nukala, S., "Properties of adhesive joint of inorganic nano-filler composite adhesive", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 15, Pages 68-74, 2008.
- 2.Barbosa, A., Silva, L.F.M., Abenojar, J. Figueiredo, M. and Öchsner, A., "Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with micro cork particles: Effect of size, amount and surface treatment", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 114, Pages 299-310, 2017.
- 3.Martuscelli, E., Musto, P. and Ragosta, G., "Advanced routes for polymer toughening", Pages 43-46, Arco Felice, Italy, 1996.
- 4.Mahrtdt, E., Pinki, S., Schmidberger, C., Herwijwn H.W.G. Veigel S. and Altmutter W.G., "Effect of addition of microfibrillated cellulose to urea-formaldehyde on selected adhesive characteristics and distribution in particle board", *Cellulose*, Vol. 23, Pages 571-580, 2016.
- 5.Mirski, R., Kawalerczyk, J., Dziurka, D., Wieruszewski, M. and Trocinski, A., "Effects of using bark particles with various dimensions as a filler for urea-formaldehyde resin in plywood", *BioResources*, Vol. 15, Issue 1, Pages 1692-1701, 2020.
- 6.Liu, J., Mo, J., Xie, E., Fang, J., Hou, Z. and Gan, W., "Utilization of carbon black from Mao bamboo as reinforcing agent for melamine urea formaldehyde resin wood adhesive", *Industrial Crops and Products*, Vol. 187, Pages 115373, 2022.
- 7.Xanthos, M., "Functional Fillers for Plastics: Second, Updated and Enlarged", Pages 19-42, Elsevier Inc, Waltham, 2005.
- 8.Njoku, R., Okon, A. and Ikpaki, T., "Effects of variation of particle size and weight fraction on the tensile strength and modulus of periwinkle shell reinforced polyester composite", *Nigerian journal of technology*, Vol. 30, Issue 2, Pages 87-93, 2011.
- 9.Vishwas, M., Vinyas, M. and Puneeth, K., "Influence of areca nut nanofiller on mechanical and tribological properties of coir fibre reinforced epoxy based polymer composite", *Scientia Iranica*, Vol. 27, Issue 4, Pages 1972-1981, 2020.
- 10.Alves, C., Ferrao, P.M.C., Silva, A.J., Reis, L.G., Freitas, M., Rodrigues, L.B. and Alves, D.E., "Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites", *Journal of cleaner production*, Vol. 18, Issue 4, Pages 313-327, 2010.
- 11.Kumar, P., Singh, R.K. and Kumar, R., Joining similar and dissimilar materials with GFRP. *International journal of adhesion and adhesives*, Vol. 27, Issue 1, Pages 68-76, 2007.
- 12.Yoon, S.H., Kim B.C., Lee, K.H. and Lee, D.G., "Improvement of the adhesive fracture toughness of bonded aluminum joints using e-glass fibers at cryogenic temperature", *Journal of adhesion science and technology*, Vol. 24, Issue 2, Pages 429-444, 2010.
- 13.Zhang, H., Zhang, Z. and Friedrich, K., "Effect of fiber length on the wear resistance of short carbon fiber reinforced epoxy composites", *Composites science and technology*, Vol. 67, Issue 2, Pages 222-230, 2007.
- 14.Park, S.W., Kim, B.C. and Lee, D.G., "Tensile strength of joints bonded with a nano-particle-reinforced adhesive", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 23, Issue 1, Pages 95-113, 2009.
- 15.Zakiah, A., Ansell, M.P., Smedley, D. and Tahir P.M., "The Effect of Long Term Loading on Epoxy-Based Adhesive Reinforced with Nano-Particles for In Situ Timber Bonding", *Advanced Materials Research*, Vol. 545, Pages 111-118, 2012.
- 16.Bagheri, R., Marouf, B. and Pearson, R., "Rubber-toughened epoxies: a critical review. *Journal of Macromolecular Science®*", Part C: *Polymer Reviews*, Vol. 49, Issue 3, Pages 201-225, 2009.
- 17.Kilik, R. and Davies, R., "Mechanical properties of adhesive filled with metal powders. *International*

Journal of Adhesion and Adhesives", Vol. 9, Issue 4, Pages 224-228.

18.Zhai, L., Ling, G. and Wang, Y., "Effect of nano-Al₂O₃ on adhesion strength of epoxy adhesive and steel", International journal of adhesion and adhesives, Vol. 28, Issue 1, Pages 23-28, 2008.

19.Ozçifci, A., Kara, M.E. and Kaymakci, A., "Impact of PF and MUF adhesives modified with TiO₂ and SiO₂ on the adhesion strength", Wood Research, Vol. 63, Issue 1, Pages 75-84, 2018.

20.Diharjo, K., Afandi, R., Purwanto, A., Suharty, N.S., Jihad, B.H., Nasiri, S.J.A., Firdaus, Y. and Tjahjana, A.D.D.P., "Adhesive nanosilica/aluminium powder—Epoxy for joint application on composite car body of electrical vehicle", Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T), Pages 1-5, Bandung, Indonesia, 2013.

21.Sanghvi, M.R., Tambare, O.H. and More, A.P., "Performance of various fillers in adhesives applications: a review", Polymer Bulletin, Vol. 79, Issue 12, Pages 10491-10553, 2022.

22.Hýsek, Š., Sedivka, P., Böhm, M., Schönfelder, O. and Beran, R., "Influence of using recycled polyurethane particles as a filler on properties of polyurethane adhesives for gluing of wood", BioResources, Vol. 13, Issue 2, Pages 2592-2601, 2018.

23.Amdouni, N., Sautereau, H. and Gerard, J., "Epoxy composites based on glass beads. II. Mechanical properties", Journal of applied polymer science, Vol. 46, Pages 1723-1735, 1992.

24.Radford, K., "The mechanical properties of an epoxy resin with a second phase dispersion", Journal of Materials Science, Vol. 6, Pages 1286-1291, 1971.

25.Spanoudakis, J. and Young, R., "Crack propagation in a glass particle-filled epoxy resin: Part 1 Effect of particle volume fraction and size", Journal of Materials Science, Vol. 19, Pages 473-486, 1984.

26.Harper, C.A., Modern plastics handbook, Chapter 1 Thermoplastics (Fillers), McGraw-Hill Education, 2000.

27.Shunmugasundaram, M., Kumar, A.P., Baig, M.A.A., and Kasu, Y., "Investigation on the effect of nano fillers on tensile property of neem fiber composite fabricated by vacuum infused molding technique", IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering, IOP Publishing, Pages 1057, 2021.

28.Johnsen, B., Kinloch, A.J., Mohammed, R.D., Taylor, A.C. and Sprenger, S., "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers", Polymer, Vol. 48, Issue 2, Pages 530-541, 2007.

29.Oksman, K., Skrifvars, M. and Selin, J.-F., "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites", Composites science and technology, Vol. 63, Issue , Pages 1317-1324, 2003.

30.Barbosa, A., Silva, L.F.M., Banea, M.D. and Öchsner, A., "Methods to increase the toughness of structural adhesives with micro particles: An overview with focus on cork particles", Materials Science & Engineering Technology, Vol. 47, Pages 4, Pages 307-325, 2016.

31.Hamza, T.A., Rosenstiel, S.F., Elhosary, M.M. and Ibraheem, R.M., "The effect of fiber reinforcement on the fracture toughness and flexural strength of provisional restorative resins", The Journal of prosthetic dentistry, Vol. 91, Issue 3, Pages 258-264, 2004.

32.Greiner, A. and Wendorff, J.H., "Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers", Angewandte Chemie International Edition, Vol. 46, Issue 30, Pages 5670-5703, 2007.

33.Fu, S.-Y., Feng, X.-Q., Lauke, B. and Mai, Y.W., "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites", Composites Part B: Engineering, Vol. 39, Issue 6, Pages 933-961, 2008.

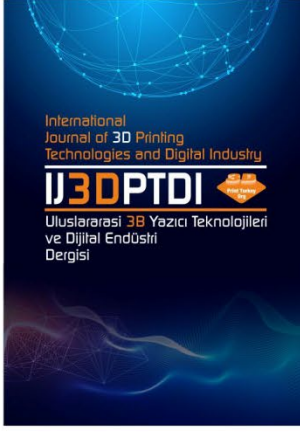
34.Cho, J., Joshi, M. and Sun, C., "Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles", Composites Science and Technology, Vol. 66, Issue 13, Pages 1941-1952, 2006.

35.Sumita, M., Shizuma, T., Miyasaka, K. and Ishikawa, K., "Effect of reducible properties of temperature, rate of strain, and filler content on the tensile yield stress of nylon 6 composites filled with ultrafine particles", Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics, Vol. 22, Issue 4, Pages 601-618, 1983.

36.Kim, B.C. and Park, S.W., "Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite", Composite structures, Vol. 86, Issue 3, Pages 69-77, 2008.

- 37.Jojibabu, P., Zhang, Y. and Prusty, B.G., "A review of research advances in epoxy-based nanocomposites as adhesive materials", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 96, Pages 102454, 2020.
- 38.Rudawska, A. and Frigione, M., "Cold-cured bisphenolic epoxy adhesive filled with low amounts of CaCO₃: Effect of the filler on the durability to aqueous environments", *Materials*, Vol. 14, Issue 6, Pages 1324, 2021.
- 39.Zare, Y., "Study of nanoparticles aggregation/agglomeration in polymer particulate nanocomposites by mechanical properties", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 84, Pages 158-164, 2016.
- 40.Zare, Y., Garmabi, H. and Sharif, F., "Optimization of mechanical properties of PP/Nanoclay/CaCO₃ ternary nanocomposite using response surface methodology", *Journal of applied polymer science*, Vol. 122, Issue 5, Pages 3188-3200, 2011.
- 41.Kahraman, R., Sunar, M. and Yilbas, B., "Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive", *Journal of materials processing technology*, Vol. 205, Issue 1-3, Pages 183-189, 2008.
- 42.Anaç, N. and Doğan, Z., "The Effect of Organic Fillers on the Mechanical Strength of the Joint in the Adhesive Bonding Processes", *Processes*, Vol. 11, Issue 2, Pages 406, 2023.
- 43.Kavak, N. and Altan, E., "A new hybrid bonding technique: Adhesive-soft soldered joints", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 228, Issue 2, Pages 137-143, 2014.
- 44.Sztorch, B., Brząkalski, D., Pakuła, D., Frydrych, M., Špitalský, Z. and Przekop, R.E., "Natural and Synthetic Polymer Fillers for Applications in 3D Printing—FDM Technology Area", *Solids*, Vol. 3, Issue 3, Pages 508-548, 2022.
- 45.Singh, G., Dondapati, R.S. and Singh, L.P., "Biomaterials Printing for Sustainability, in Sustainability for 3D Printing", Springer, Pages 15-28, 2021.
- 46.Malik, A., Haq, M.I.U., Raina, A. and Gupta, K., "3D printing towards implementing Industry 4.0: sustainability aspects, barriers and challenges. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*", Vol. 49, Issue 3, Pages 491-511, 2022.
- 47.Ekrem, M., "Hekzagonal Bor Nitrür Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri", *El-Cezeri, Cilt*, 6, Sayı 3, Pages 585-593, 2019.
- 48.Esun, "Esun PLA+ Properties", <https://www.esun3d.com/pla-pro-product/>, 2 Ocak 2020.
- 49.Bordes, M., Davies, P., Cognard, J-Y., Sohier, L., Moynot, V.S., and Galy, J., "Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water", *International journal of adhesion and adhesives*, Vol. 29, Issue 6, Pages 595-608, 2009.
- 50.Souza, J.P. and Reis, J.M., "Thermal behavior of DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) adhesives and its influence on the strength of joints", *Applied Adhesion Science*, Vol. 1, Issue 1, Pages 1-10, 2013.
- 51.Frascio, M., Mandolino, C., Moroni, F., Jilich, M., Lagazzo, A., Pizzorni, M., Bergonzi, L., Morano, C., Alfano, M., Avalle, M., "Appraisal of surface preparation in adhesive bonding of additive manufactured substrates", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 106, Pages 102802, 2021.
- 52.Khosravani, M.R., Soltani, P., Weinberg, K. and Reinicke, T., "Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints", *Polymer Testing*, Vol. 100, Pages 107262, 2021.
- 53.Soykök, İ.F., "İç Basınca Maruz Olarak Çalışan Darbe Hasarlı Cam Elyaf / Epoksi Kompozit Tüplerin Yama Onarım Analizi" [Patch Repair Analysis of Impact Damaged Glass Fiber/Epoxy Composite Tubes Operating Under Internal Pressure] [article in Turkish], *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. Cilt 25, Sayı 73, Pages 107-120, 2023.
- 54.Huntsman, "Araldite 2015 Adhesive", <https://docs.rs-online.com/47fc/A700000006492752.pdf>, 06 Ekim 2015.
- 55.Henkel, "Loctite EA 9466", https://www.henkel-adhesives.com/tr/en/product/structural-adhesives/loctite_ea_9466.html, 20 August 2019.
- 56.Akovali, G., "Plastic materials: polyvinyl chloride (PVC), in Toxicity of building materials", Elsevier, Pages 23-53, 2012.

- 57.Ahmad, T. and Guria, C., "Progress in the modification of polyvinyl chloride (PVC) membranes: A performance review for wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*", Vol. 45, Pages 102466, 2022.
- 58.Maul, J., Frushour, B.G., Kontoff, J.R., Eichenauer, H., Ott, K.H. and Schade, C., "Polystyrene and styrene copolymers. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, Vol. 29, Pages 475-522, 2007.
- 59.Günaydın, O., Demir, A., Atahan, A., Yardım, T. and Yücedağ, İ., "Evaluation of novel thiophene branched polystyrene as insulator layer in organic electronic device", *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1185, Pages 121-127, 2019.
- 60.Raheem, D., "Application of plastics and paper as food packaging materials-An overview", *Emirates Journal of Food and Agriculture*,: Vol. 15, Issue 3, Pages, 177-188, 2013.
- 61.Fontes, S.T., Fabrício A.O., Lima G.S., Bueno, M., Schneider, L.F.J., Piva, E., "Tetrahydrofuran as alternative solvent in dental adhesive systems", *Dental Materials*, Vol. 25, Issue 12, Pages 1503-1508, 2009.
- 62.Ikeda, T., Munck, J.D., Shirai, K., Hikita, K., Inoue, S., Sano, H., Lambrechts, P. and Meerbeek, B.V., "Effect of evaporation of primer components on ultimate tensile strengths of primer-adhesive mixture", *Dental Materials*, Vol. 21, Issue 11, Pages 1051-1058, 2005.
- 63.Liu, F., Yu, W., Wang, Y., Shang, R., Zheng, Q., "Curing kinetics and thixotropic properties of epoxy resin composites with different kinds of fillers", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 18, Pages 2125-2139, 2022.
- 64.Dusek, M., Zou, L., and Hunt, C., "Rheology testing of solder pastes and conductive adhesives used in stencil printing", *Matc(A)*102, 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>

DÖRT BACAĞI KEŞİF ROBOTUNUN PROTOTİP TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

PROTOTYPE DESIGN AND MANUFACTURING OF A
FOUR-LEGGED EXPLORATION ROBOT WITH A
THREE-DIMENSIONAL (3D) PRINTER

Yazarlar (Authors): Alper Kadir TANYILDIZI 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tanyıldızı K. A., “Dört Bacaklı Keşif Robotunun Prototip Tasarımı ve Üç Boyutlu (3B) Yazıcı ile İmalatı” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 233-242, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1277891

Araştırma Makale/ Research Article

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

DÖRT BACAKLI KEŞİF ROBOTUNUN PROTOTİP TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

Alper Kadir TANYILDIZI ^{a*} 

^a Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: atanyildizi@firat.edu.tr

(Received: 05.04.23; Revised: 19.07.23; Accepted: 12.08.23)

ÖZ

Dört bacaklı robotlar, çeviklik, dengeli hareket ve farklı zorlu arazi şartlarına uyum sağlama yetenekleri nedeni ile keşif, arama kurtarma, tarım, inşaat ve askeri alanlarda büyük ilgi görmektedir. Ayaklı robotlara her alandan uzmanın ilgisi artarken, araştırmacılar uygun maliyetli ve yüksek manevra yetenekli robotlar geliştirmek adına çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu çalışma, dört bacaklı bir 12 serbestlik dereceli bir robotun tasarımı, 3 boyutlu yazıcıda üretilmesi ve ileri kinematik analizine ait detaylar sunulmuştur. Robotun üç boyutlu modeli SolidWorks programında modellenmiş ve sonrasında parça modelleri 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak PLA malzemeden imal edilmiştir. Robotun her bir bacağı üç serbestlik dereceli olup, aktuatör olarak DC servo motorlar kullanılmıştır. Robotun denge ve yörünge kontrol yazılımları Arduino Mega gömülü sistem kartı üzerinde geliştirilmiştir. Robot uzaktan kumanda edilmektedir ve üzerinde yer alan RGB kamera sayesinde çevresel algılama da yapabilmektedir. Bu çalışmanın, düşük bütçeli ve kolayca imal edilebilir dört ayaklı bir robota ihtiyaç duyan araştırmacılara yol göstermesi açısından akademik çalışmalara katkıda bulunması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dört Bacaklı Robot, Robot Kinematığı, Üç Boyutlu (3B) Yazıcı, Keşif Robotu.

PROTOTYPE DESIGN AND MANUFACTURING OF A FOUR-LEGGED EXPLORATION ROBOT WITH A THREE-DIMENSIONAL (3D) PRINTER

ABSTRACT

Four-legged robots have gained significant interest in fields such as exploration, search and rescue, agriculture, construction, and the military due to their agility, balanced movement, and adaptability to various challenging terrains. As person from different domains show increasing interest in legged robots, researchers continue their efforts to develop cost-effective and highly maneuverable robotic systems. This study presents the details of the design, 3D printing, and advanced kinematic analysis of a twelve-degree-of-freedom quadruped robot. The three-dimensional model of the robot was created using the SolidWorks program, and its component parts were 3D printed using PLA material. Each leg of the robot has three degrees of freedom, utilizing DC servo motors as actuators. The robot's balance and trajectory control software were developed on an Arduino Mega embedded system board. The robot can be controlled remotely and is equipped with an RGB camera for environmental perception. The aim of this study is to contribute to academic research by providing guidance to researchers in need of a low-budget and easily manufacturable four-legged robot.

Keywords: Quadruped Robot, Robot Kinematics, 3D Printer, Exploration Robot.

1. GİRİŞ

Bacaklı robotlar engebeli arazide hareket etmek için en iyi seçenek olarak görülmektedir.

Bacaklı robotlar, zorlu arazi koşullarında tekerlekli veya paletli araçlara göre; yüksek hız, hareketlilik, zemin düzensizliklerinde uyum

gibi önemli avantaja sahiptirler. Özellikle de son yıllarda batarya ve küçük ebatlı yüksek torklu motor teknolojilerinin gelişmesi ile quadruped robotlardaki gelişim hızlanmıştır [1]. Kanz ve ark. [2] tasarladıkları dört ayaklı robot, küçük ve ucuz olmasına karşın oldukça güçlü ve sağlam bir robottur. Robotun boyu 0,3 m ve ağırlığı 9 kg'dır. Robot saniyede 2,45 metreye varan hızlarda süratli koşu, zıplama hareketlerini yapabilmektedir ve ters takla atabilmektedir.

Sombolestan ve ark. [3] 12 kg ağırlığında Unitree A1 isiminde dört ayaklı bir robot geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri robot için yeni bir uyarlanabilir kuvvet tabanlı kontrol yöntemi sunmuşlardır. Yöntemlerinin başarısını hem benzetim hem de donanım deneyleri ile göstermişlerdir. Robot ağırlığının yarısı kadar yükleri engelleyen arazide dahi taşıyabilmektedir. Ayrıca robot önerdikleri kontrolör yöntemi ile 5 cm'den daha az izleme hatasıyla, 11 kg'a kadar yükleri taşıyabilmektedir.

Cardenas [4] ve ark. düşük maliyetli bir dört ayaklı robotun tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu robot, ROS (Robot Operating System) çerçevesi kullanan açık kaynaklı, düşük maliyetli, dört ayaklı bir tasarıma sahiptir. Simülasyon ve testlerle robotun doğal hareket görevlerini başarıyla yerine getirdiği gösterilmiştir.

Boney ve ark [5] araştırmacıların kolayca üretebilmeleri için düşük maliyetli açık kaynak bir ant robot geliştirmiştir. Robotun malzeme maliyeti yalnızca 410 USD ve bir saatten daha kısa sürede monte edilebilir. Robotun kontrolü ise takviyeli öğrenme yöntemi ile sağlanmaktadır.

Sun ve ark. [6] açık kaynaklı, küçük boyutlu, yeniden yapılandırılabilir olan Lilibot adlı dört ayaklı robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Modüler yapısı sayesinde her yönde esnek hareket yapabilmektedir. Robotun kontrolü için uyarlanabilir sinir denetleyicisi tasarlamışlardır.

Kau ve ark. [7] dinamik hareket kabiliyetine sahip yarı doğrudan tahrikli Stanford Doggo isimli dört ayaklı bir robot geliştirmişlerdir. Robotun donanım ve yazılımı açık kaynaklıdır, üretim ve montaj için yalnızca el aletleri gerektirir ve maliyeti 3000 USD'dan düşüktür.

Grimminger ve ark. [8] düşük maliyetli, basit yapılı ve tork kontrollü ayaklı robot tasarımı önermişlerdir. Robot 2.2. kg olup, geniş bir hareket aralığına sahiptir. Robotta ayrıca sekiz özdeş aktüatör modülü ve ayak temas sensörleri mevcuttur. Robot, plastik 3D baskı ile üretilmiştir.

Kim ve ark.[9] on iki serbestlik dereceli, üzerinde derinlik sensörü ve GPU da yeni bir açık kaynaklı dinamik dört ayaklı robot PADWQ isimli platformu geliştirmişlerdir. PADWQ tamamen kullanıma hazır bileşenlerden ve standart 3D yazıcıdan imal edilmiş yapısal parçalardan üretilmiştir. Robotun uygun fiyatlı ve araştırmacıların çalışmalarına hızlı ve kolay bir şekilde adapte edilebilir olduğunu vurgulamışlardır.

Gu Yuping ve ark. [10] dört kol mekanizması ile çalışan dört bacaklı bir robot tasarlamışlardır. Her bir bacak iki serbestlik dereceli olup servo aktüatörler ile hareket ettirilmektedir. Robotun uzuvlar 3D baskı yoluyla üretilmiş ve bacak parametrelerini manipüle edilebilirlik ve kuvvet iletimini analiz ederek optimize etmişlerdir.

Wing Lu ve ark. [11] iki serbestlik dereceli hafif ve modüler paralel mekanizmalı dört ayaklı bir robot tasarlamışlardır. Robotun prototipinin 3D teknolojisi ile yapmışlardır. Robotun bacak ağırlığını azaltmak ve aktarım hassasiyetini artırmak için, tahrik mekanizmasını yatay yerleştirmişlerdir. Eklem aktüatörü olarak MG90 servo motorlar kullanmışlardır. Robot tırıs, ayakta durma, kalkış ve yürüme koşullarının hepsini sağlamaktadır. Robotta kontrol modülü olarak STM32 bulunmaktadır. Robotu wireless modülü ile uzaktan kontrol edebilmektedirler.

Tsvetkov ve ark. [12] kabuklu yengeçlerden ve gorillerin mafsallı yürüteç ön ayaklarından esinlenilerek ön iki bacağa monteli manipülatörle donatılmış küçük ölçekli dört ayaklı bir robot tasarlamışlardır. Robotun her bir bacak üç serbestlik derecelidir. Robot 3D teknolojisi ile imal edilmiş olup toplam ağırlığı 1408.8 gr dır.

Dhananjaya ve ark. [13] 3D teknoloji ile üretilmiş ve dokunsal algılama sensörleri ile donatılmış ayaklara sahip DogTouch isimli dört bacaklı robot geliştirmişlerdir. Robot üzerinde

yer alan sensörlerden alınan veriler ile geliştirilen evrişimli sinir ağı sayesinde farklı yüzey dokularının tanınması sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerdikleri modelin %74,37'lik bir doğrulukla yüzey tespiti yapabildiğini göstermektedir.

Weerakkodi ve ark. [14] HyperDog isminde tamamen 3D baskılı parçalardan ve karbon fiberden dört ayaklı bir robotik köpek tasarlamış ve üretmişlerdir. Robot 12 RC servo motor, bire adet NVIDIA Jetson nano ve STM32F4 geliştirme kartı içermekte olup açık kaynaklı bir platformdur. Robotun ROS ortamında dayalı olarak hareket kontrol yazılımları ve simülasyonunu da geliştirilmişlerdir.

Rahme ve ark. [15] hobi servoları ve yerleşik bir mikroişlemci ile donatılmış açık kaynaklı 3D baskılı teknolojisi ile OpenQuadruped isimli robotu üretilmiş ve farklı yüzey koşullarında yürüme analizine dair sonuçları sunmuşlardır.

Rahman ve ark. [16] eğitim ve güvenlik amacı ile düşük maliyetli Iron Dog Mini dört ayaklı robotunu tasarlamışlardır. Robotun maliyetini düşük ve bakımını basit tutmak için dört ayaklı robotlarını modüler formda tasarlamışlardır. Robotun bacaklarını altı kol mekanizması ile tasarlamışlardır. Bacağın hafif olması için aktuatorler gövde içine yerleştirilmiş ve bu mekanizma ile eklemlere güç aktarımı sağlanmıştır. Robotlarının kinematik analizini ve yürüme simülasyon sonuçlarını sunmuşlar ve prototip robotun sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Sun ve ark. [17] robotik bacakların verimli tasarımını elde etmek, bacağın yapısal rijitliği ile eğilme esnekliğini dengelemek için için topoloji optimizasyonuna dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca, robotun 3D yazıcı teknolojisi ile prototipini üretmiş ve test sonuçlarını da sunmuşlardır. Robotun kararlı ve sürekli düz çizgi yürüme hareketlerini başarıyla gerçekleştirebildiğini göstermişlerdir.

Zhang ve ark. [18] son derece düşük maliyetli dört ayaklı bir robotun tasarımını yapmış ve prototipini üretmişlerdir. Tasarladıkları robot

için özel itici kuvvet aktarım mekanizması tasarımı yapmış, 3D baskı teknolojisi ile bu bileşenleri imal etmiş ve sonlu elemanlar analizi (FEA) ile de parçaların dayanım test sonuçlarını analiz etmişlerdir.

Bu çalışmada, standart 3B yazıcı ile PLA malzeme yapısındaki parçalardan oluşturulmuş açık kaynaklı, dinamik dört ayaklı bir robot platformuna ait detaylar sunulmuştur. Robotun kinematik denklemleri de sunularak her bir bacak ekleminin açısal hareket sınırları belirlenmiştir. Makalenin organizasyon planı ise Bölüm 2'de aktuatör ve malzeme seçimi, üç boyutlu tasarım kinematik modelleme ve imalata ait detaylar yer almaktadır. Bölüm 3'de robotun hareket analizine ait görseller ve veriler sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 4'de tasarımın var olan açık kaynak robotlar ile özellik karşılaştırması ve gelecek çalışma planı tartışılmıştır.

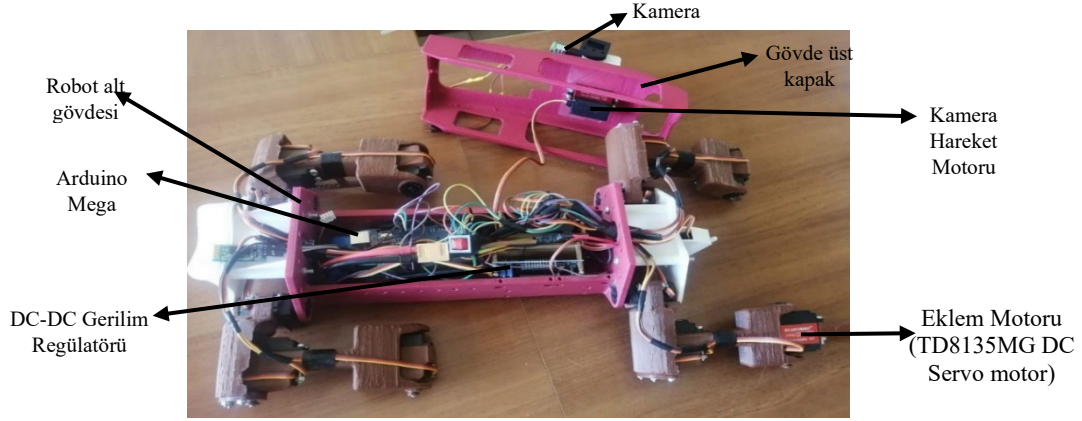
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında dört bacaklı keşif robotunun tasarımını yapabilmek için öncelikle robotun eklem hareketleri için uygun tahrik sisteminin, güç kaynağının ve uygun elektronik donanımların seçiminin yapılması gerekmektedir.

2.1. Malzeme Seçimi

Eklem bacaklı robotik sistemlerde eklem tahrik motorlarının ve elektronik donanımların seçimi yapılırken uygulanacak imalat yönteminin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada mekanik parçalarının imalatının üç boyutlu (3D) yazıcı ile PLA malzemeden imal edilmesi planlanmıştır. Çalışmada temel amaç hızlı ve yüke dayanıklı esnek bacak hareketlerine sahip, tasarım amacı olan keşif görevini yaparken kararlı dinamik hareketler gerçekleştirebilecek bir dört bacaklı robotun prototip uygulamasını gerçekleştirmektir.

Dört bacaklı robot çalışmaları incelendiğinde, belirli bir yürüme örüntüsünü gerçekleştirirken bacak eklem frekanslarının 1-2,9 Hz aralığında olduğu görülmüştür [19-20]. Sistemdeki tüm eklemlerin hızları bu frekans aralığına göre



Şekil 1. Robotun montaj esnasında görüntüleri

belirlenebilirse dört bacaklı robotun kararlı dinamik hareketi gerçekleştirilmesi sağlanmış olacaktır. Bu çalışmadaki dört bacaklı robot prototipinde eklem frekansının yaklaşık 2 Hz olması hedeflenmiştir.

Prototip tasarımına uygun fiziksel parametreleri, yüksek tork, seri ve esnek hareket kabiliyeti, dahili motor sürücü, konum geri bildirim gibi belirleyici avantajlarından dolayı eklemlerin hareketi için TD8135MG DC Servo Motor kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 1. TD8135MG DC Servo Motor teknik özellikleri

Parametre	Değer
Ağırlık	56 gr
Dişli Tipi	Metal
Sınır Açısı	270°
Çalışma Gerilimi	4,8-7,2 V
Tutma Torku	32,7-35,2 kg.cm
Çalışma Akımı	2,6-3,4 A
Çalışma Hızı (180° açığı süpürme hızı)	0,5-2,5 ms
Boyut	40 x 20,5 x 40,5 mm

Çizelge 1’de TD8135MG DC servo motorun teknik özelliklerine bakıldığında motorun 180°’lik açığı tarama hızının max. 2,5 ms olduğu görülmektedir. Belirli bir yürüme örüntüsünde eklemlerin hareket periyodu, eklemin hedef açısal konuma gidiş ve dönüş hareketinin toplam süresi olarak hesaplanır. Bacak eklemlerindeki en büyük açısal hareket aralığı 135° olarak öngörülmüştür. Buna rağmen eklemlerin 180°’lik açısal hareketi yapabildiği varsayıldığında servo motor 1 cycle hızı yaklaşık 5 ms’ e kadar tüm hareketleri yapabilecektir. Bu çalışmadaki dört bacaklı keşif robotunun eklem hareketi yaklaşık 2 Hz

olduğu daha önce belirtilmiştir. Dolayısıyla robotun eklemlerinin 1 cycle hızı 0,5 s = 500 ms olacaktır. Bu doğrultuda etiket değerlerindeki sayısal veriler analiz edildiğinde TD8135MG DC servo motorun dört bacaklı keşif robotuna kararlı, esnek ve hızlı hareket kabiliyeti kazandıracığı öngörülmüştür.

Kullanım kolaylığı, çok sayıda dijital ve analog giriş/çıkış pini, kolay programlanabilirliği gibi özelliklerinden dolayı gömülü elektronik sistem kartı olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır. Dört bacaklı robotun keşif yapabilmesi için ihtiyacı olan çevresel algılama birimi olarak OV7670 kamera seçilmiştir.

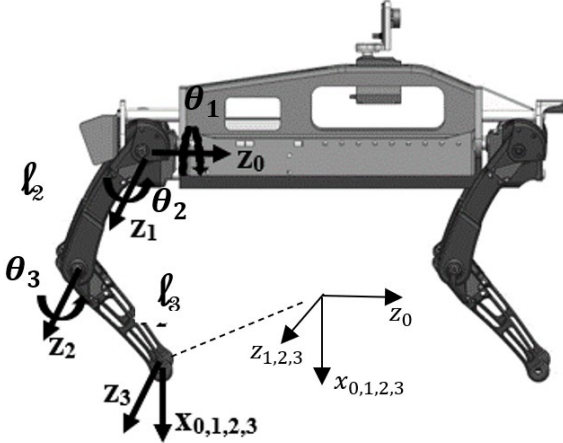
12 serbestlik dereceli dört bacaklı keşif robotunun güç kaynağı olarak Li-Po bataryalar tercih edilmiştir. Her bir eklem için motorların çekeceği ortalama akım değerleri dikkate alınarak sistemin çekeceği toplam akım değerine göre mevcut imkânlar doğrultusunda 11,1 V 5200 mAh kapasiteli Li-Po batarya kullanılması uygun görülmüştür. Çizelge 1’de eklem tahrik motorlarının çalışma akım değerleri göz önünde bulundurulduğunda tercih edilen Li-Po bataryanın 25C kapasitesinden dolayı enerji ihtiyacını karşılayacağı öngörülmüştür. Ancak tahrik motorlarının, gömülü sistem kartının, kamera ve diğer elektronik donanımların çalışma gerilimleri farklı olduğundan ön ve arka bacakların eklemleri için 2 adet ZK-12KX 12A akım kapasiteli DC-DC gerilim regülatörü kullanılmıştır.

2.2. Kinematik Analiz

Robotik sistemlerde kinematik analiz, ileri ve ters kinematik analiz olarak ele alınmaktadır. İleri kinematik, robotun uç işlevcisinin

pozisyon ve oryantasyonunun hesaplanması [21], ters kinematik ise robotun uç işlevcisinin yönelim ve pozisyonu bilindiğinde eklem açısall konumlarının belirlenmesidir [22-23].

Çalışmada sunulan dört bacaklı robotun tek bacağına kinematik analizi için gerekli olan eksen yerleşimi [24] Şekil 2’de verilmiştir. İleri kinematik analizde Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmış ve D-H tablosu oluşturularak Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bacak eksen takımı yerleşimi

Çizelge 2. D-H Tablosu

Link No	θ	d	α	a
1	θ_1	0	90°	0
2	θ_2	0	0	l_2
3	θ_3	0	0	l_3

Çizelge 2’deki D-H tablosuna göre her bir bacak ekleminin dönüşüm matrisi (A_i) hesaplanmış ve bu matrislerin çarpımıyla tek bir bacağın temel dönüşüm matrisi (2)’deki gibi elde edilmiştir.

$${}^3_0T = A_1A_2A_3 \quad (1)$$

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} C_{23}C_1 & -S_{23}C_1 & S_1 & l_2C_1C_2 + l_3C_1C_{23} \\ C_{23}S_1 & -S_{23}S_1 & -C_1 & l_2S_1C_2 + l_3S_1C_{23} \\ S_{23} & C_{23} & 0 & l_2S_2 + l_3S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denavit-Hartenberg metoduna göre 3_0T temel dönüşüm matrisinin son sütunundaki matematiksel ifadeler robot uç noktasının konumunu vermektedir. İleri kinematik analiz sonucu x,y,z eksenlerindeki konum ifadeler (3)’te verilmiştir.

$$\begin{aligned} p_x &= l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3), \\ p_y &= l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_3 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3), \\ p_z &= l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (3)$$

İleri kinematik analiz ile elde edilen uç noktasının koordinatları kullanılarak ters kinematik analiz gerçekleştirilmiştir.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right), \theta_2 = \arctan\left(\frac{a_z}{a_x \cos \theta_1 + a_y \sin \theta_1}\right)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{p_z \cos \theta_2 - p_x \cos \theta_1 \sin \theta_2 + p_y \sin \theta_1 \cos \theta_2}{-l_2 + p_z \sin \theta_2 + p_x \cos \theta_1 \cos \theta_2 + p_y \sin \theta_1 \cos \theta_2}\right) \quad (4)$$

Burada $a_{x,y,z}$, dönüşüm matrisinin vektörlerini ifade etmekte olup [25] ters kinematik analiz sonucunda eklemlerin açı değerlerinin hesaplandığı matematiksel ifadeler (4)’teki gibidir.

2.3. Mekanik Tasarım

Dört bacaklı keşif robotu SolidWorks programında tasarlanmıştır. Tüm donanımların yer aldığı ve montajı tamamlanmış dört bacaklı robot yapısı Şekil 3’de verilmiştir.

Tasarlanan robot yapısında her bir bacakta 3 adet döner eklem bulunmaktadır. Kamera sisteminin tek eksenindeki hareketi ile birlikte tüm sistem 13 serbestlik derecedir. Tasarım yapılırken sistem uzuvlarının mümkün oldukça hafif ve mukavemetli özellikle olması hedeflenmiştir. Ayrıca bacak eklem ve uzuv yapılarının esnek hareket kabiliyetine sahip olması, belirlenen yürüme örüntülerine göre hareketini gerçekleştirebilmesi ve mekanik kilitlenmelere yol açmaması göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

2.4. İmalat ve Montaj

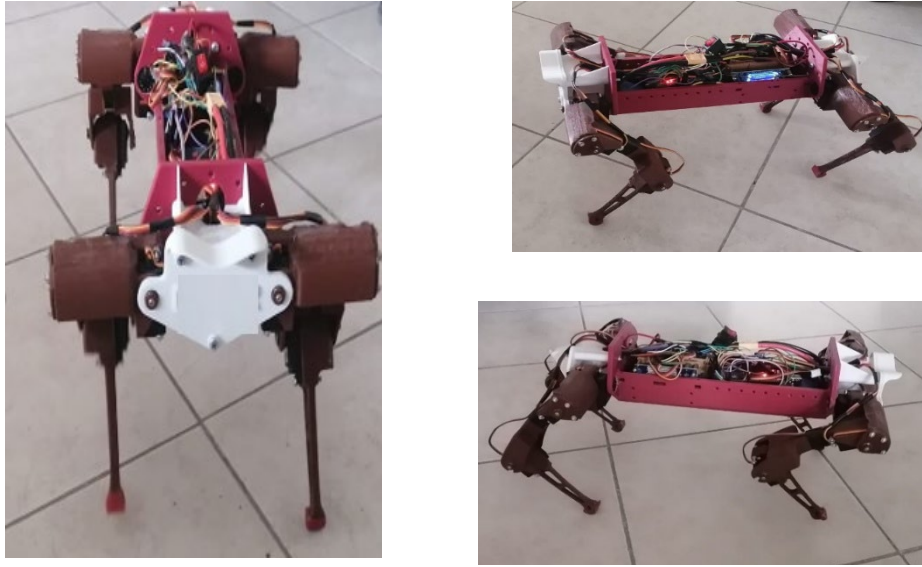
Dört bacaklı robotun mekanik parçalarının imalatı 40 x 40 cm tabla ölçülerine sahip bir 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Robot parçaları PLA malzemeden imal edilmiştir. Üretime ilişkin diğer parametreler Çizelge 3’de özetlenmiştir.

Çizelge 3. Robotun fiziksel boyutları

Nozzle Sıcaklığı	216 °C
Yatak Sıcaklığı	62 °C
Doluluk Oranı	%40
Baskı Hızı	100 mm/s
Desen Tipi	Izgara Tipi
Oryantasyon Açısı	90 derece

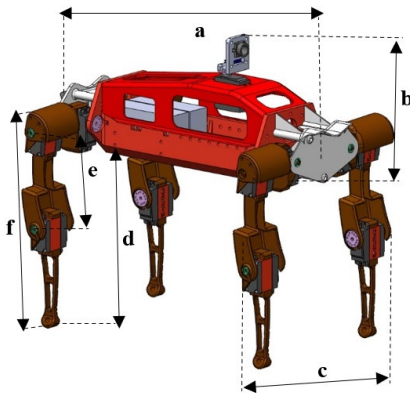


Şekil 3. Dört bacaklı keşif robotu tasarımı



Şekil 4. Dört bacaklı keşif robot montajı

. Şekil 4’de imalatı gerçekleştirilen dört bacaklı keşif robot yapısı görünmektedir. Üretilen tüm mekanik parçaların SolidWorks ortamında yapılan tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen montajının ardından tüm donanımlarla birlikte sistemin toplam ağırlığı 2,64 kg olup fiziksel parametre değerleri Şekil 5 ve Çizelge 4’te verilmiştir



Şekil 5. Dört bacaklı keşif robotu fiziksel ölçüleri

Çizelge 4. Robotun fiziksel boyutları

a	380 mm
b	167 mm
c	258 mm
d	216 mm
e	121 mm
f	274 mm

3B yazıcı ile imalat aşamasında robot sistemindeki tüm parçaların ağırlığı ve üretim süreleri Çizelge 5’te görünmektedir.

Çizelge 5. 3B yazdırma sonuçlarının özeti

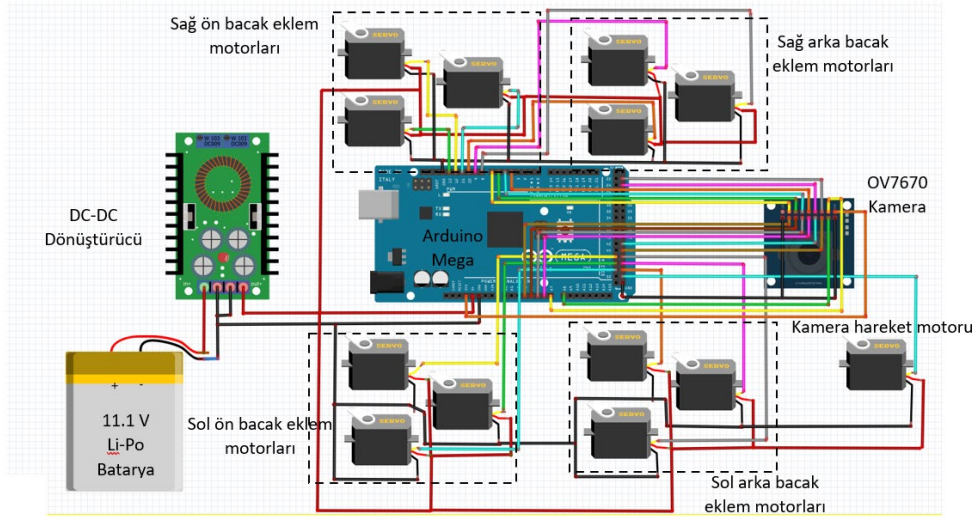
Parça Adı	Ad	Kullanılan Malzeme (g)	Yazdırma Süresi (hr)
Gövde Üst Kapak	1	238	19,6
Gövde Alt Kapak	1	363	28,8
Kamera Aparat	1	8	1,1
Tibia Uzun Sağ	2	24	3,5
Tibia Uzun Sol	2	26	3,6
Femur Uzun Sağ	2	44	7
Femur Uzun Sol	2	44	7

Hip Eklem Sağ	2	45	7,1
Hip Eklem Sol	2	45	7,1
Hip Aparat Sağ	2	3	0,5
Hip Aparat Sol	2	3	0,5
Gövde Ön Parça	1	36	5,2
Gövde Arka Parça	1	35	5,1

2.5. Elektronik Devre Şeması

Dört bacaklı robot yapısında kullanılan elektronik donanımların bağlantısı Şekil 9'da gösterilmektedir. Elektronik devre sisteminde

yüksek akım sağlama avantajından dolayı Li-Po batarya kullanılarak sistem donanımlarının bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Kamera hareket motoru ile birlikte toplamda 13 adet servo motorun, DC-DC konvertörün ve kameranın tüm bağlantıları Arduino gömülü sistem kartının uygun pinine bağlanarak elektronik devre şeması Şekil 6'daki gibi oluşturulmuştur.

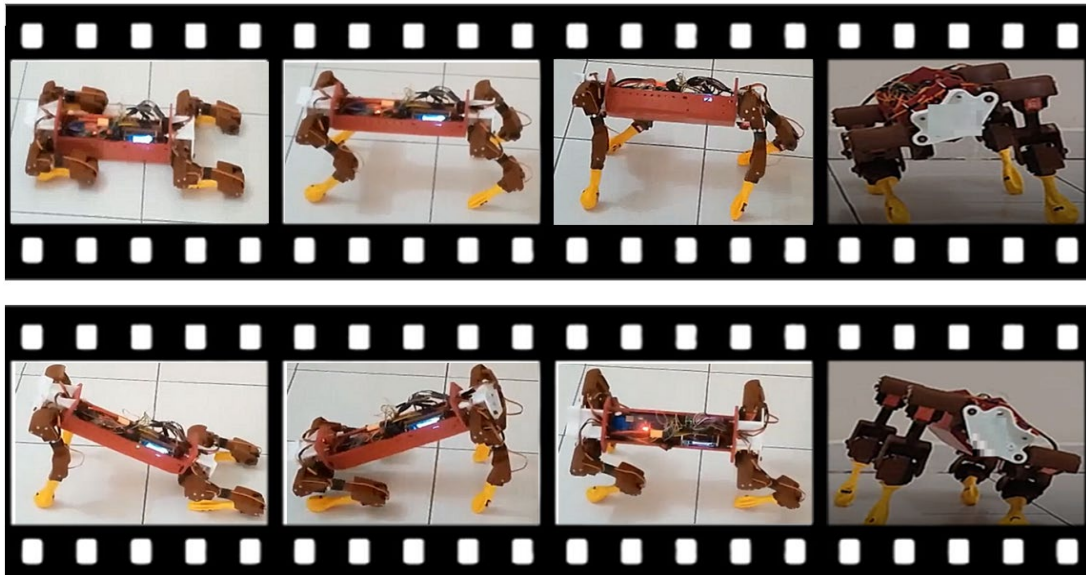


Şekil 6. Robotun elektronik devre şeması

3. DENEYSEL SONUÇLAR

İmalatı ve montajı yapılan dört bacaklı keşif robotunun hareket kabiliyetini göstermek amacı ile yatış, yakta duruş, sağa doğru eğilme, sola doğru eğilme, öne ve arkaya doğru eğilme hareketleri ve sabit hızla trot

yürüme hareket testleri yaptırılmıştır. Robotun bu hareketler esnasındaki görselleri Şekil 7'de sunulmuştur. Ayrıca robotun hareketine ilişkin çekilen test videosunun linki teşekkür başlığı içerisinde paylaşılmıştır.



Şekil 7. Dört bacaklı robotun hareketi esnasında çekilmiş videodan örnek görseller

Çizelge 6. Robotun maliyet dökümü (Malzemelerin Mart 2023 tarihindeki piyasa fiyatları dikkate alınmıştır)

Malzeme	Birim Fiyat (USD)	Adet	Toplam Fiyat (USD)	Toplam Maliyetteki Payı (%)
Servo Motor	34	13	442	70,50
Arduino Mega	45	1	45	7,18
RGB Kamera	8	1	8	1,27
3B Yazıcı Malzeme	16	1	16	2,55
DC-DC Konvertör	18	2	36	5,74
Li-Po Batarya	77	1	77	12,28
Sarf Malzeme (Cıvata, somun, rulman, Jumper kablo)	3	1 Tk.	3	0,48
GENEL TOPLAM FİYAT (USD):			627	

Çizelge 7. Mevcut açık kaynak dört bacaklı robotların karşılaştırması

Robot	Serbestlik Derecesi (DoF)	Gövde Uzunluğu (m)	Bacak Uzunluğu (m)	Toplam Kütle (kg)	Maliyet (USD)	İmalat Yöntemi
Mevcut Çalışmadaki Robot	12+1	0,38	0,274	2,64	627	3B Yazıcı
PADWQ [8]	12	0,42	0,44	12,7	7692	3B Yazıcı
Solo [7]	8	0,42	0,44	2,2	4720	3B Yazıcı
Doggo [6]	8	0,42	0,44	4,8	3000	Lazer Kesim-Karbon/Alüminyum
Iron Dog Mini [16]	12	0.30	0.29	2.572	332.18	3B Yazıcı

Çizelge 6'da robotun imalatında kullanılan malzemelerin Mart 2023 tarihi piyasa fiyatlarına dayalı olarak maliyeti hesaplanmış ve sunulmuştur. Robotun toplam imalat maliyeti 627 USD'dir. Maliyetin büyük bir kısmını motorlar, batarya ve gömülü sistem kartı oluşturmaktadır. 3D baskı sarf malzemeleri (PLA), toplam maliyetin yalnızca %2,55'ini oluşturmaktadır. Çizelge 7'de ise mevcut açık kaynaklı dört bacaklı robotların özellik karşılaştırması sunulmuştur. Bu çalışmada imal edilen robotun maliyeti diğer açık kaynaklı robotlardan (Iron Dog Mini [16] hariç) nispeten daha uygundur. Hareket kabiliyeti olarak da 12 serbestlik dereceli olduğundan Solo ve Doggo'dan çok daha yüksek hareket kabiliyetine sahiptir. Ayrıca en hafif ve ebatsal olarak en küçük robotlar arasında yer aldığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dört bacaklı 12 serbestlik dereceli açık kaynaklı robotun tasarım ve imalat süreci aktarılmıştır. Robotun temel bazı hareketler (yürüme, öne arkaya ve iki yana eğilme) için deneysel testleri yapılmış ve uzun süreli çalışma için dayanıklı ve güvenilir olduğu gösterilmiştir. Dört ayaklı robotumuzun

maliyeti yalnızca 627 USD'dir ve bu, açık kaynak olarak tasarlanmış pek çok dört ayaklı robot platformlarından önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca mevcut robotlarla karşılaştırıldığında, önerilen robot hafif ve manevra yeteneği de oldukça iyidir. Bu yönü ile sunulan tasarımın araştırmacılara ilham olacağı düşünülmektedir.

Gelecekteki çalışmalar olarak şu anda uzaktan kumanda ile kontrol ettiğimiz robotun, görüntü temelli çevresel algılama yazılımları geliştirilerek otonom hareketinin sağlanması ve keşif görüntülerinin uzak haberleşme ile ana karar birimine aktarımının sağlanması hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

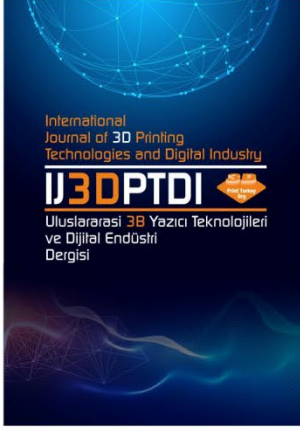
Finansman: Bu araştırma için herhangi bir finansman kaynağı bulunmamaktadır. Çalışmanın videosuna <https://youtu.be/JtS-inlSaQY> linkinden ulaşabilirsiniz.

Çıkar Çatışması: Alper Kadir Tanyıldızı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

1. Biswal, P., Mohanty, P.K., “Development of quadruped walking robots: A review”, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 12, Issue 2, Pages 2017-2031, 2021.
2. Katz, B., Carlo, J.D., Kim, S., “Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control”, In *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pages 6295–6301, 2019.
3. Chen, Y., Nguyen, Q., “Adaptive Force-based Control for Legged Robots”, *arXiv*, arXiv:cs.RO/2011.06236, 2021.
4. García-Cárdenas, F., Soberón, N., Ramos, O.E., Canahuire, R.C., “Low-cost Open-source Semi-Autonomous Quadruped Robot”, In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Pages 281–286, 2020.
5. Boney, R., Sainio, J., Kaivola, M., Solin, A., Kannala, J., “RealAnt: An Open-Source Low-Cost Quadruped for Research in Real-World Reinforcement Learning”, *arXiv*, arXiv:2011.03085, 2020.
6. Sun, T., Xiong, X., Dai, Z., Manoonpong, P., “Small-Sized Reconfigurable Quadruped Robot With Multiple Sensory Feedback for Studying Adaptive and Versatile Behaviors”, *Front. Neurorobot*, Vol. 14, 2020.
7. Kau, N., Schultz, A., Ferrante, N., Slade, P., “Stanford Doggo: An Open-Source, Quasi-Direct-Drive Quadruped”, In *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pages 6309–6315, 2019.
8. Grimminger, F., Meduri, A., Khadiv, M., Viereck, J., Wüthrich, M., Naveau, M., Berenz, V., Heim, S., Widmaier, F., Flayols, T., et al., “An Open Torque-Controlled Modular Robot Architecture for Legged Locomotion Research”, *IEEE Robot. Automat. Lett.*, Vol. 5, Pages 3650–3657, 2020.
9. Kim, J., Kang, T., Song, D., Yi, S.J., “Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot”, *Appl. Sci.*, Vol. 11, Pages 3762, 2021.
10. Gu, Y., Feng, S., Guo, Y., Wan, F., Dai, J.S., Pan, J., Song, C., “Overconstrained coaxial design of robotic legs with omni-directional locomotion”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 176, Issue 105018, 2022.
11. Lu, M., Jing, B., Duan, H., Gao, G., "Design of a Small Quadruped Robot with Parallel Legs", *Complexity*, Vol. 2022, Pages 1-11, 2022.
12. Tsvetkov, Y., Ramamoorthy, S., “A Novel Design and Evaluation of a Dactylus-Equipped Quadruped Robot for Mobile Manipulation”, 2022 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022.
13. Mudalige, N.D.W., Nazarova, E., Babataev, I., Kopanev, P., Fedoseev, A., Cabrera, M.A., Tsetserukou, D., “Dogtouch: Cnn-based recognition of surface textures by quadruped robot with high density tactile sensors”, In 2022 *IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring)*, Pages 1-5, 2022.
14. Mudalige, N.D.W., Zhura, I., Babataev, I., Nazarova, E., Fedoseev, A., Tsetserukou, D., “Hyperdog: An open-source quadruped robot platform based on ros2 and micro-ros”, In 2022 *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Pages 436-441, 2022.
15. Rahme, M., Abraham, I., Elwin, M.L., Murphey, T.D., “Linear policies are sufficient to enable low-cost quadrupedal robots to traverse rough terrain”, In 2021 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Pages 8469-8476, 2021.
16. Rahman, M.H., Alam, S.B., Mou, T.D., Uddin, M.F., Hasan, M., “A Dynamic Approach to Low-Cost Design, Development, and Computational Simulation of a 12DoF Quadruped Robot”, *Robotics*, Vol. 12, Issue 28, Pages 1-23, 2023.
17. Sun, Y., Zong, C., Pancheri, F., Chen, T., Lueth, T.C., “Design of topology optimized compliant legs for bio-inspired quadruped robots”, *Scientific Reports*, Vol. 13, Issue 4875, Pages 1-11, 2023.
18. Zhang, Y.N., An, M.Q., “Structure and software architecture design of an extremely low-cost quadruped robot for education”, In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1931, Issue 1, Pages 012007), 2021.
19. Yan, W., Pan, Y., Che, J., Yu, J., Han, Z., “Whole-body kinematic and dynamic modeling for quadruped robot under different gaits and mechanism topologies”, *PeerJ Computer Science*, Vol. 7, Pages 1-21, 2021.
20. Wang, H., Chai, H., Chen, B., Xie, A., Song, R., Su, B., “Flying trot control method for quadruped robot based on trajectory planning”, *Journal of Mechatronics*, Pages 1-35, 2022.

21. Zhang, D., Gao, Z., “Forward kinematics, performance analysis and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 28, Pages 484-492, 2012.
22. Nahangi, M., Yeung, J., Haas, C.T., Walbridge, S., West, J., “Automated assembly discrepancy feedback using 3D imaging and forward kinematics”, *Automation in Construction*, Vol. 56, Pages 36-46.
23. Ayyıldız, M., Çetinkaya, K., “Comparison of four different heuristic optimization algorithms for the inverse kinematics solution of a real 4-DOF serial robot manipulator”, *Neural Comput & Applic* Vol. 27, Pages 825–836, 2016.
24. Tatar, A.B., Taşar, B., Yakut, O., “A shooting control application of four-legged robots with a gun turret”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 45, Pages 5191-5206, 2020.
25. Liu, H., Zhou, W., Lai, X., Zhu, S., “An efficient inverse kinematic algorithm for a PUMA560-Structured robot manipulator”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, Pages 1-5, 2013.



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>

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN RÖLE ANAHTARLAMALI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARLANMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A RELAY-
SWITCHED BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR
THE ELECTRIC VEHICLES

Yazarlar (Authors): Abdulsamet PALTACI , Samet YALÇIN , Abdullah GENÇ 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Paltacı A, Yalçın S., Genç A., “Elektrikli Araçlar İçin Röle Anahtarlama Batarya Yönetim Sisteminin Tasarlanması ve Gerçekleştirilmesi” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 243-251, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1324753

Araştırma Makale/ Research Article

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

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN RÖLE ANAHTARLAMALI BATARYA YÖNETİM SİSTEMİNİN TASARLANMASI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Abdulsamet PALTACI ^a , Samet YALÇIN ^b *, Abdullah GENÇ ^a 

^a Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

^b Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: sametyalcin@isparta.edu.tr

(Received: 09.07.23; Revised: 03.08.23; Accepted: 17.08.23)

ÖZ

Elektrikli araçların günümüzde yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte batarya teknolojileri gelişimiyle sorunları da beraberinde getirmektedir. Yükselen depolama talebiyle birlikte batarya yönetim sistemine olan ihtiyaç da artmaktadır. Ancak endüstride kullanılan yöntemlerin yanı sıra maliyetin düşürülmesi amacıyla röle anahtarlamalı batarya yönetim sistemi tasarımı ile bu makale literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Bu çalışmada 23 Seri LiFePO₄ hücre ile yaklaşık 5kW/h enerji kontrolü Master-Slave yöntemi, röle anahtarlamalı ve Stm32f108c8t6 mikro işlemcileri ile kontrolü sağlanmıştır. Master-Slave arasındaki haberleşme CAN-Bus protokolü ile yapılarak her Slave kartın göndermiş olduğu hücre gerilimleri, hücre paketi ve hücrelerin sıcaklık değerlerini Master kartı üzerinden kalan enerji miktarı ile birlikte, izleme merkezi tarafından takip edilmesi için Master kartına lora modülü entegre edilerek sistemin uzaktan izlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede hücrelerin doğru bir şekilde izlenebilmesinden dolayı şarj anında herhangi bir hücrenin 3.6 V seviyesine çıktığında dengelemeye girmesi ve deşarj anında ise 2.8 V seviyesine indiğinde sistemin kapatılması sağlanarak hücrelerinin doğru kullanımı ile ömrünü uzatma işlemi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Batarya Yönetim Sistemi, LiFePO₄, Master-Slave, Can-Bus Haberleşme, Pasif Dengeleme.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A RELAY-SWITCHED BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR THE ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

As electric vehicles are becoming more widespread today, battery technologies bring problems with their development. With the increasing storage demand, the need for a battery management system is also increasing. However, in addition to the methods used in the industry, this article has made an important contribution to the literature with the design of a relay-switched battery management system in order to reduce the cost. In this study, approximately 5kW/h energy control with 23 Series LiFePO₄ cells is provided with Master-Slave method, relay switching, and Stm32f108c8t6 microprocessors. The communication between Master-Slave is done with CAN-Bus protocol and the cell voltages, cell package, and temperature values of the cells sent by each Slave card are monitored remotely by integrating the lora module into the Master card in order to be monitored by the monitoring center together with the remaining energy amount on the Master card. In this way, since the cells can be monitored accurately, it is ensured that any cell enters into balancing when it reaches 3.6 V level at the time of charging and the system is turned off when it drops to 2.8 V level at the time of discharge, thus extending the life of the cells with the correct use of the cells.

Keywords: Electric Vehicles, Battery Management System, LiFePO₄, Master-Slave, CAN-Bus Communication, Passive Balance.

1. GİRİŞ

Artan nüfus yoğunluğu ve çevre kirliliğiyle birlikte atmosfere yayılan karbon salınımı gün geçtikçe önlem alınamaz bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtlı araçlardan elektrikli araçlara geçiş önemli bir hale gelmiştir. Böylece elektrikli araçlar ile birlikte elektrikli araçlarda kullanılan batarya ve bu bataryaların yönetim teknikleri de önemli bir hal almaktadır. Elektrikli araçların batarya yönetim sistemi (BYS) üzerinde literatürde pasif dengeleme (PD) üzerine birçok çalışma vardır [1-6]. Uygulanabilirlik ve maliyet açısından ön plana çıkan PD yöntemi birçok kez tercih sebebi olmuştur. Bu yöntemle birlikte kullanılan modüler sistemlerin gelişmesi günümüz elektrikli araçların temel ihtiyaçları arasına girmektedir [7]. BYS’de bataryaları kontrol etmenin yanı sıra seri haldeki bataryaların enerji akışı için ayrı bir devre yapısına ihtiyaç vardır. Bu devre yapısında bataryaları kontrol eden ünite/ler Slave, bu Slave ünite ile enerji giriş-çıkışı kontrol eden üniteye ise Master olarak isimlendirilir [5,8]. Master-Slave arasında haberleşme günümüz I2C, USART ve CAN-Bus protokolleri ile yapılmaktadır. Gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda ise otomobillerinde de bulunan ve kullanılan kontrolcüde çıkış pinleri kontrol edilebilen CAN-Bus haberleşme protokolü kullanılmıştır.

Maliyetin gün geçtikçe arttığından dolayı eski anahtarlama yöntemlerinden rölenin birçok avantajlı olduğu kısımlar görülmüştür ve tasarlanması planlanan BYS yapısında röle ile başarılı sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Seri hücrelerin fazla olması batarya kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Literatür incelendiğinde 2021 yılındaki bir çalışmada [1], 4 seri hücre kontrol edilmiş ve hücre ölçümleri fark alma Op-Amp devresiyle yapılmıştır. Yapılan çalışmada CAN-Bus kullanılarak da veri gönderimi gerçekleştirilmiştir. Başka bir çalışmada ise, hücre dengeleme kontrolünün anahtarlama sırasında PC817 optokuplörü kullanılmıştır [4,9]. Bunun yanı sıra, LiFePO₄ (Lityum Demir Fosfat) hücreler için hızlı dengelemenin yapıldığı çalışmada hem optokuplör hem de

Op-Amp yardımıyla fark alma işlemi gerçekleştirilmiştir [3]. Diğer bir çalışmada, STM32f103C8 mikroişlemcisi kullanılarak CAN-Bus ve Uart haberleşmesi kullanılarak yapılan Master-Slave çalışması yapılmıştır [5]. Hücre ölçümlerinin genellikle literatürde yaygın olan Op-Amp kullanarak fark alma ile yapıldığı tespit edilmiştir. Böylelikle tasarımların hassas ölçüm alınabilmesi ve uygun maliyetli olması sağlanmaktadır [1-4, 10].

Literatür incelendiğinde genellikle Li-Ion hücrelerin 4-12 seri ve maksimum 20 seri olduğu tespit edilmiştir [2]. Bu çalışmada ise özgün olarak 72V nominal gerilime sahip BLDC (fırçasız DC) motorun çalışabilmesi için 23 seri hücreyle kontrol edilmiştir. 3 adet Slave kartı kullanılmış ve bunun avantajı ise, her Slave hücre paketinin dengelemesinin ayrı şekilde olması nedeniyle sistemin ve dengelemenin hızlı yapılabilmesidir. Sistemin belirli aralıklarda dengelemeyi başlatması ise sahip olunan enerjiyi verimli kullanmak ve hücrelerin sağlığı açısından avantajlıdır.

Tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılan modüler BYS, Master-Slave kontrolüyle pasif dengeleme yapısı bozulmadan röle anahtarlama olarak gerçekleştirilmiştir ve bu sayede endüstriyel olarak uygulanabilirliğini arttırılmıştır. Sistemin modüler özellikte olması ile daha sonra kullanıcının isterse BMS devresindeki toplam gerilimi artırabilmesi veya azaltabilmesi hedeflenmiştir. Elektrikli araçlar için tasarlanan sistem LiFePO₄ hücrelerinden oluşturulmuş 23S 11P bir hücre paketine sahiptir. Tasarlanan sistemin haberleşme protokolleri ile birlikte hem kendi içindeki veri aktarımı hem de uzaktan izleme merkezine aktarılan verilerin kontrolü gerçekleştirilmiş olup, riskli durumlara karşı alınan önlemler belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada 2. Bölümde batarya yönetim sisteminin simülasyon ve PCB tasarımları gerçekleştirilmiş, tasarım sonuçları ve entegrasyonu açıklanmıştır. Makalenin 3. Bölümünde BYS’nin hücre gerilimleri sınır değerleri ve bu değerlere bağlı olarak gerçekleştirilen dengeleme aralıkları

verilmiştir. 4. Bölümde ise elde edilen sonuçlar gösterilmiş ve tartışılmıştır.

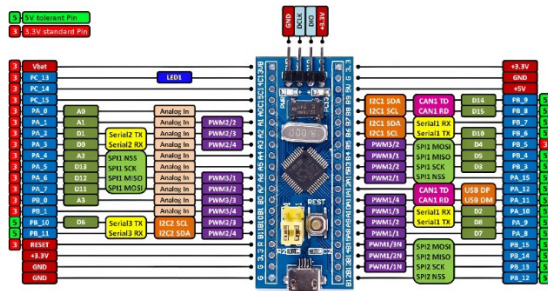
2. MATERYAL VE METOT

LiFePO₄ batarya hücrelerin ömürleri, 2000 çevrimi bulmakta ve güvenlik açısından yanma, patlama ve ısınma riskleri oldukça düşüktür. Elektrikli araçlar gibi yüksek kapasite ve deşarj gereken uygulamalarda yaygın olarak kullanılır ve farklı tiplerde bulunmaktadır. Bu çalışmada, LiFePO₄ 32700 3.2V 6000 mAh modeli tercih edilmiştir LiFePO₄ 32700 hücre özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Bu Çizelge incelendiğinde, kapasitelerinin yüksek olmalarından dolayı bu hücreler tercih edilmiştir [11]. Lityum tabanlı hücrelerin karşılaştırılmasının literatürde var olduğu bilinmektedir [12].

Çizelge 1. LiFePO₄ 32700 hücre özellikleri.

Parametreler	Değerler	Birimler
Ortalama voltaj	3.2	V
Deşarj kesme voltajı	2.0	V
Şarj voltajı üst sınırı	3.65	V
Hücre kapasitesi	6000	mAh
Beklenen şarj akımı	1200	mA
Beklenen deşarj akımı	3	A
Hızlı şarj akımı	6	A

Önerilen bataryaları sağlıklı bir şekilde kontrol eden Master-Slave kartları için tercih edilen mikroşlemci olarak STM32F103C8T6 seçilmiştir. Piyasada bulunan Blue Pill olarak da adlandırılan geliştirme kartına karar verilmiştir. Şekil 1’te STM32f103c8t6 geliştirme kartının pin bağlantıları verilmiştir. Blue Pill kartları üzerinde, 72MHz’a kadar hızı sahip ve ARM Cortex-M3 mikroşlemcisi bulunmaktadır ve 3.3V gerilimde çalışan bu kart, 10 adet ADC Pini içerir ve Can protokolü kullanır.

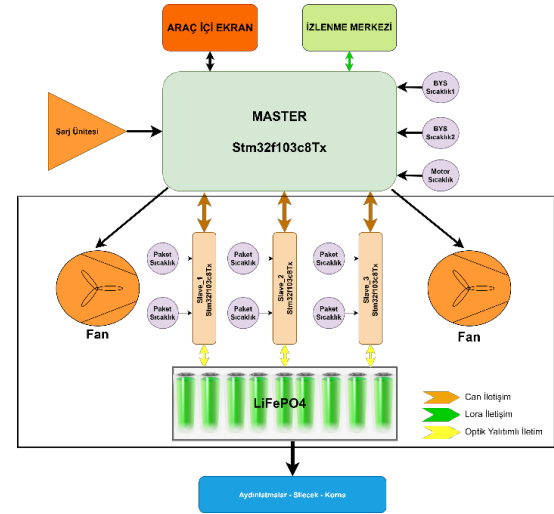


Şekil 1. Stm32f103c8t6 geliştirme kartı pin bağlantıları [13].

2.1. Batarya Yönetim Sisteminin Tasarlanması

Önerilen BYS için LiFePO₄ hücrelerden oluşan 23 seri, 11 paralel modüler bir sistem tasarlanmıştır. Bunun yanında modüler bir sistemle birlikte, Slave kartlarının artırılmasıyla yüksek voltajların kontrolünün sağlamak mümkündür. Kullanılması planlanan röle ve fark alıcı Op-Amplar ile tasarımın uygun maliyette olması planlanmıştır. Doğru veri aktarımı ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlarından dolayı literatürde CAN-Bus protokolünün kullanıldığı bilinmektedir [14]. Bu nedenle bu çalışmada haberleşme sistemleri için CAN-Bus protokolü kullanılmıştır.

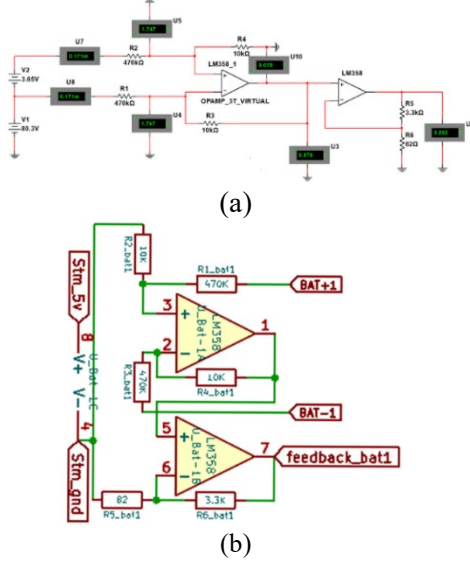
Elektrikli araçlar için BYS akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. BYS tasarımı için, 1 adet Master, 3 adet Slave kart ile devre yapısı oluşturulmuştur. Sistemde izleme merkezi, aydınlatma, fan ve sıcaklık gibi giriş-çıkış birimleri bulunmaktadır. Ayrıca piller için gerekli olan 72 V DC gerilim girişi için şarj ünitesi girişi oluşturulmuştur.



Şekil 2. Elektrikli araçlar için BYS akış şeması

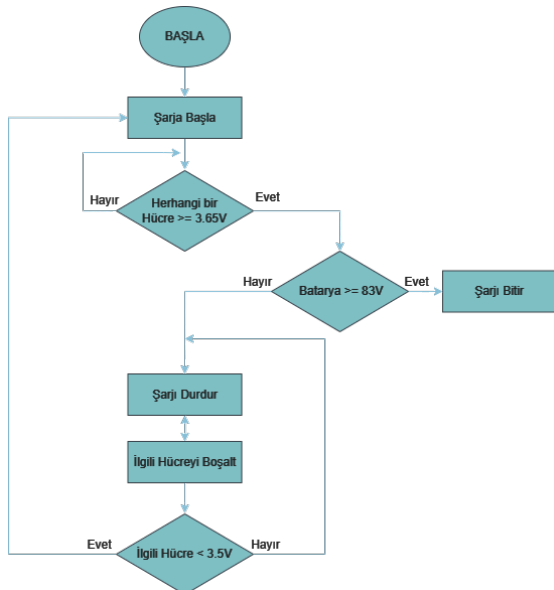
BYS’nin en önemli kısımlarından biri, gerilim ölçümüdür. Hücrelerin gerilim değerleri izlenerek dengeleme ve sağlıklı şarj-deşarj işlemine karar verilir. Bu işlem gerilim ölçüm entegresi, op-amp ile gerilim bölücü devresi veya fark alıcı devresi şeklinde gerçekleştirilebilir. Ancak burada maliyet ve performans açısından yapılabilecek en iyi çalışmanın fark alıcı op-amplar ile kontrolçüye bilgi verilmesi olduğu görülmüştür. Bu nedenle hücre gerilim ölçümü için, Şekil 3a’da simülasyonu verilen fark alıcı devresi kullanılmıştır. Simülasyonu yapılan bu

devrenin şematik tasarımı da Şekil 3b'de gösterilmiştir. Tasarım aşamasında kullanılan fark alıcı devresi için yaygın olan Op-Amp çeşitlerinden LM358 modeli tercih edilmiştir [15].



Şekil 3. Hücre gerilim ölçüm devresinin a) simülasyon görüntüsü, b) şematik tasarımı

Önerilen BYS akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre, tasarımı yapılan Slave kart, anlık hücre gerilimlerini okuyarak 23 seri hücreden herhangi biri 3.65V'u geçmesi durumunda şarj kapatıp ilgili hücrenin enerjisini taş direnç üzerine boşaltmasını sağlar. Boşalma işlemi belli bir süre devam ettikten sonra Slave kart, Master karttan aldığı komutla dengeleme işlemini kapatır ve Master kart şarj işlemi tekrar başlatır. Böylece, pasif dengeleme sistemi gerçekleştirilir [16-17].

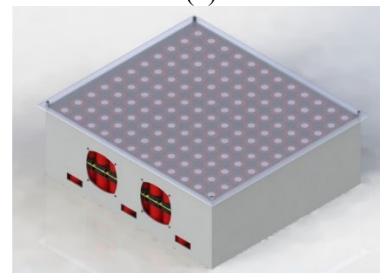
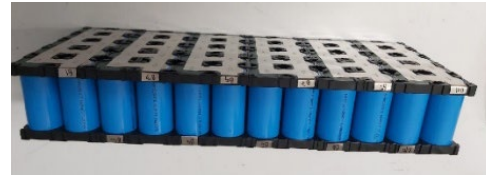


Şekil 4. Önerilen BYS akış şeması

LiFePO₄ batarya paketinin puntalanmış, izole edilmiş ve metal kutulanmış görüntüsü, Şekil 5'te verilmiştir. Pil hücreleri öncelikle puntalanarak dizginlenmiş olup daha sonra alev geçirmez kâğıt ile izole edilmiştir. Son olarak, metal bir kutu içerisinde kullanıma hazır hale getirilmiştir.

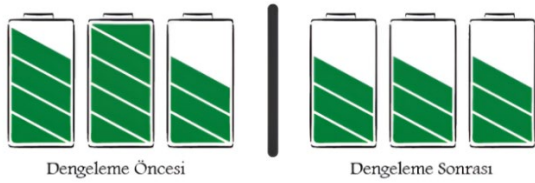
Dengeleme anahtarı olarak 3 adet 8 kanal 5 V röle kartı kullanılmıştır. Bu röle tipinde, kanal tetik pin hattına 0V uygulandığında anahtar kesime geçerek hücrenin taş direnç üzerinden boşalmasına izin verilir. Bunun yanı sıra, yapılan tasarımın hız, batarya gerilimleri, sıcaklık değerleri ve kalan enerji gibi verilerin görüntülenmesi için Nextion model 5.0 inch dokunmatik ekran kullanılmıştır.

BYS ile dokunmatik ekran arasındaki veri akışı sağlamak için CAN-Bus haberleşme protokolü kullanılmıştır. Çünkü bu haberleşme protokolü, sağlıklı veri aktarımından dolayı otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Burada, veri aktarımı sağlanırken Master Kart, Slave kartlar ile kendi aralarında veri hatlarını karşılaştırarak doğru veri hattında mesajın iletilmesini sağlar. Bu sayede veri kayması veya veri kaybolması gibi durumlar ortadan kaldırılır.



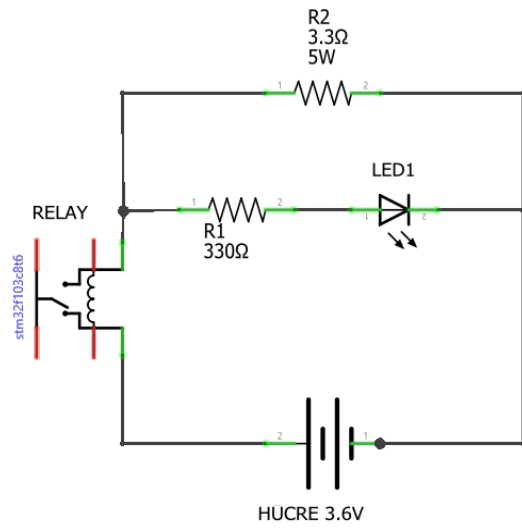
Şekil 5. LiFePO₄ batarya paketinin a) puntalanmış b) izole edilmiş c) metal kutulanmış görüntüsü

Hücreler sağlıklı şekilde şarj edilebilmesi için seri bağlanan hücre gerilimlerinin aynı olması istenmektedir ve bu, BYS'nin temel amaçlarından biridir. Pasif dengeleme için bataryanın önceki ve sonraki hali Şekil 6'da verilmiştir. Bu işlem, gerilimi yüksek olan hücrenin taş direnç üzerine boşaltılması ile diğer hücrelerin gerilim değerlerine eşitlenir. Bu yöntemin, aktif dengeleme yöntemine göre enerji kaybının daha fazla olmasından dolayı verimliliği daha düşüktür. Ancak, aktif dengeleme yöntemi, maliyet ve karmaşıklığından dolayı pasif dengeleme yöntemi kadar endüstride kullanılmamaktadır [7, 12].



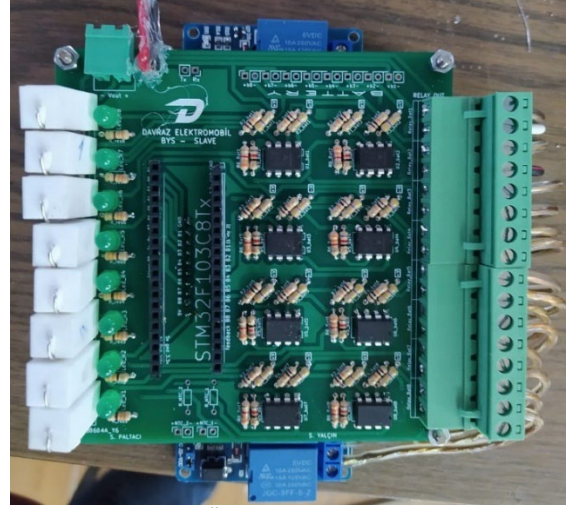
Şekil 6. Pasif dengeleme için bataryanın önceki ve sonraki hali

Dengeleme yaparken anahtarlamayı röle ile yapmak maliyet açısından verimli olacaktır. Her bir seri hücreye bir röle olmak üzere 23 adet röle kullanılmıştır. Röle kullanımındaki topoloji şekil 7'de verildiği üzere işlemci tarafından tetiklenmesi durumunda akım 1 A olacak şekilde hücreyi boşaltmak için 3.3Ω 'luk taş direnç tercih edilmiştir. Dengeleme esnasında hangi hücrenin dengelemeye girdiğini göstermek için de led kullanılmıştır.



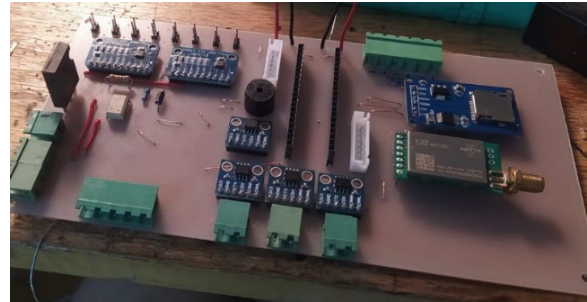
Şekil 7. Dengeleme topolojisi

Şekil 10'da görüldüğü üzere Slave kartın şematik devre çizimi verilmiştir. Kullanılan 23 seri hücre rölesi, 8 adet seri hücre alabilen 3 Slave karta son kartın 7 hücre alabileceği şekilde paylaştırılmıştır. Slave kartlar, 8 adet seri hücrenin gerilim okumasını ve röle tetiklemesini yaparken CAN-Bus ve sıcaklık okuma özelliklerini de bünyesinde barındırır. Şematiği verilmiş olan Slave kartın, PCB baskısı Şekil 8'da verilmiştir.

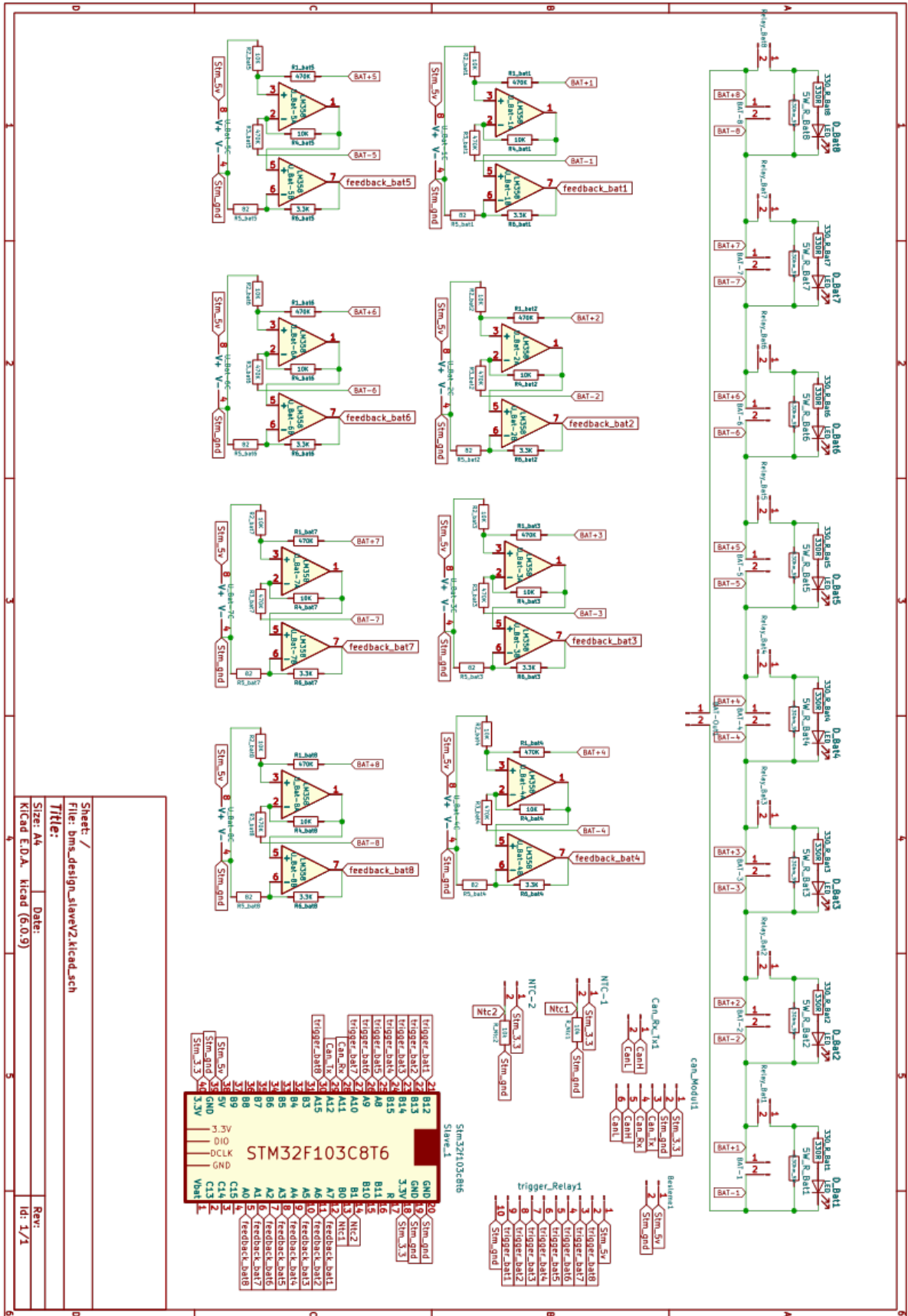


Şekil 8. Üretilen Slave PCB kartı

Üretilen Master kartı, Şekil 9'da gösterilmiştir. Buna göre, tasarımı yapılan Master kart, her Slave karttan seri hücrelerin gerilim bilgisini alıp yine Slave kartlara komut gönderir. Bunun yanı sıra kablosuz haberleşmeyi sağlayan LoRa (long range) modülü ve log kaydı sağlamak için kullanılan SD kart ve modülü, Master kart üzerinde bulunur. Ayrıca Master kart, sıcaklık ölçümü ve kontrolü, akım okuma ve CAN-Bus ile veri aktarımı gibi özelliklere de sahiptir. Slave kartların ve Master kartların test setupları kurulmuş olup algoritmaları yazılmış ve testler yapılmıştır. Böylelikle, tüm birimler harici olarak test edilmiştir.



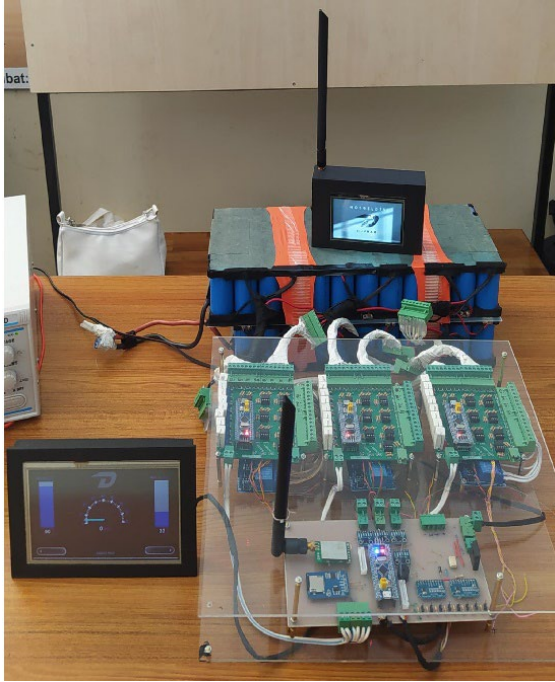
Şekil 9. Master kartı



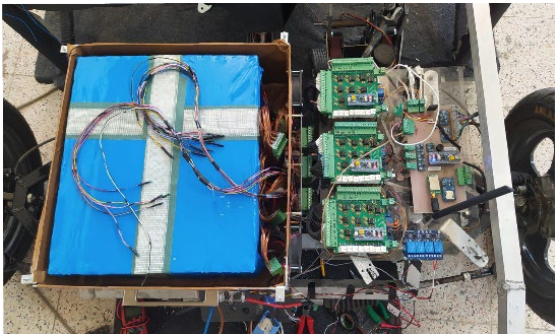
Şekil 10. Slave şematik tasarımı

2.2. Batarya Yönetim Sisteminin Entegrasyonu

Entegre edilmiş batarya yönetim sistemi ve elektrikli araç üzerindeki montajı, Şekil 11’de verilmiştir. Buna göre, Master kart ve Slave kartların entegrasyonu ile birlikte batarya hücrelerinin şarj, hücre gerilim kontrolü, kablosuz haberleşme ve veri depolaması gibi işlemler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra entegre edilmiş Master-Slave kartları elektrikli araca uygun bir şekilde yerleştirilmiş ve araç üzerinde test edilmiştir. Elde edilen bulgular Bölüm 3’te verilmiştir. Bu batarya yönetim sistemi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi bünyesinde üretilmiş ve Teknofest Uluslararası Efficiency Challenge Elektrikli Araç Yarışlarında 2022 ve 2023 yıllarında kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 11. a) Entegre edilmiş batarya yönetim sistemi, b) elektrikli araç üzerindeki montajı

3. DENEYSEL BULGULAR

Tasarımı yapılan BYB'nin dengeleme durumları test edilmiştir. Aşırı gerilim sınırları tanımlanmıştır. Aşırı gerilim sınırları Çizelge 2’de verildiği gibi çalıştırılmış ve sınır değerler incelenmiştir.

Çizelge 2. Dengeleme gerilim aralıkları

Parametreler	Değeri	Birimi
Dengeleme Giriş	3.60	Volt
Dengeleme Çıkış	3.40	Volt

Slave kart şarj dengeleme başlangıcı için seri hücrelerdeki gerilim değerleri Çizelge 3’te gösterilmiştir. Tasarımı yapılan Slave kartın aşırı gerilim koruması ve dengeleme sonuçları test edilmiştir. Grafik 1’de verilen Slave kartın seri hücrelerinin gerilim değerleri gözükmemektedir. Seri-2 hücresi 3.60V üzerinde bir gerilim algıladığında dengelemeye giriş için şarj işlemi kesilip, Seri-2 hücresinin geriliminin 3.40 V seviyesine gelene kadar deşarj işlemi yapmıştır.

Çizelge 3. Slave kart şarj dengeleme başlangıcı

Hücre Numaraları	Gerilim değeri (V)	Dengeleme Durumu
1. Seri Hücre	3.29	0
2. Seri Hücre	3.62	1
3. Seri Hücre	3.35	0
4. Seri Hücre	3.25	0
5. Seri Hücre	3.28	0
6. Seri Hücre	3.28	0
7. Seri Hücre	3.25	0
8. Seri Hücre	3.24	0

Çizelge 4’te gösterildiği gibi ilgili seri hücre deşarj işlemi 3.40V gerilim seviyesinin altına düşürdükten sonra tekrar şarj işlemine devam etmesi için işlemciden Master karta CAN-Bus haberleşmesi ile veri aktarılmıştır.

Çizelge 4. Slave kart şarj dengeleme sonrası

Hücre Numaraları	Gerilim değeri (V)	Dengeleme Durumu
1. Seri Hücre	3.26	0
2. Seri Hücre	3.39	0
3. Seri Hücre	3.35	0
4. Seri Hücre	3.20	0
5. Seri Hücre	3.28	0
6. Seri Hücre	3.27	0
7. Seri Hücre	3.25	0
8. Seri Hücre	3.23	0

Slave kart deşarj dengeleme sırası Çizelge 5'te verildiği gibi deşarj işlemi sırasında hücre gerilimleri anlık olarak takip edilerek 3.1 V'da uyarı ve 2.8 V altına düştüğünde ise sistemi kapatma komutu Master kart tarafından verilmektedir.

Çizelge 5. Slave kart deşarj dengeleme sırası

Hücre Numaraları	Gerilim değeri (V)	Sistem Kapatma durumu
1. Seri Hücre	2.86	0
2. Seri Hücre	3.00	0
3. Seri Hücre	2.95	0
4. Seri Hücre	2.80	1
5. Seri Hücre	2.90	0
6. Seri Hücre	2.92	0
7. Seri Hücre	2.85	0
8. Seri Hücre	2.89	0

Batarya paketine konumlandırılan 10 adet sıcaklık sensörünün tepki durumları incelendiğinde 40 °C seviyesine geldiğinde fanlar çalışarak ve 60 °C üstüne çıktığında ise sistemi kapatma komutu Master kart tarafından verilmektedir. Bu durum Çizelge 6'da detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 6. Sıcaklığa bağlı olarak fan ve sistem kapatma durumları

Maksimum sıcaklık değeri (°C)	Fan çalışma durumu	Sistem Kapatma durumu
35	0	0
40	1	0
60	1	1

4. SONUÇLAR

Yapılan tasarımda yüksek deşarj, hızlı dengeleme ve maliyet, batarya yönetim sisteminin önemli parametrelerindedir. Tasarlanan sistemin Elektrikli araç yarışlarında yarışan aracımızda kullanılarak çalışması yakından takip edilmiştir. Böylelikle röle anahtarlama bir sistemin otomotiv sektöründe dahi kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Yapılan çalışmada röleli anahtarlama ile kontrolcünün gerçekleştirilen gerilim izleme yöntemi ile batarya hücrelerinin doğru zamanda 3.6 V değerinde dengelemeye alarak 2.8 V değerinde de bataryaların ömrünü uzun tutmak amacıyla sistemin kapatılması gerçekleştirilmiştir. Kapladığı alan ve büyüklüğünden dolayı gerçekleştirilen batarya yönetim sistemi için iyileştirmeye gidilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 1919B012215008 nolu 2209-A projesi altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Guran, I.C., Perisoara, L.A., Florescu, A., Sacaleanu, vD.I., "4-Cell passive battery management system for automotive applications", 2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pages 338-341, Timisoara, Romania, 2021.
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B. & Sözen, F. (2020). Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı 2020 (HORA), 227-238.
- Soydaş, Ş., "Lityum tabanlı batarya paketleri için batarya yönetim sistemi tasarımı", Master's thesis, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2015.
- Perisoara, L.A., Guran, I.C., Costache, D.C., "A passive battery management system for fast balancing of four LiFePO4 cells", 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Pages 390-393, Iasi, Romania, 2018.
- Kıvrak, S., Özer, T., Oğuz, Y., "STM32f103C8 mikroişlemcisi kullanılarak elektrikli araçlar için pasif dengeleme metodu tabanlı batarya yönetim sistemi tasarımı ve uygulaması", Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, Cilt 20, Sayı 3, Sayfa 426-433, 2020.
- Dai, H., Zhang, X., Wei, X., Sun, Z., Wang, J., Hu, F., "Cell-BMS validation with a hardware-in-the-loop simulation of lithium-ion battery cells for electric vehicles", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 52, Pages 174-184, 2013.
- Menak, R., Karadağ, T., Altuğ, M., Tan, N., "Elektrikli araçlarda batarya yönetim sistemleri üzerine bir derleme çalışması", Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, Cilt 8, Sayı 2, Sayfa 234-275, 2021.
- Özdemir, M.C., "Li-ion batarya karakterizasyonu, modellemesi ve batarya yönetim sistemi tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017.
- İnan, R., Güçkiran, M., Altinişik, Y.E., Tek, S. Potuk, M., "Elektrikli araçlar için iyileştirilmiş pasif

dengeleme yöntemi ile tasarlanan batarya yönetim sisteminin gerçek-zamanlı uygulaması”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 38, Sayı 3, Sayfa 1757-1768, 2023.

10. Saleh Y.B., Kürüm, H., “Design of energy management system base on lithium-ion battery”, European Journal of Science and Technology, Özel Issue 28, Pages 1144-1151, 2021.

11. SoliCELL, “Specifications for Product 32700 LiFePO4 6000mAh Lithium-Ion Rechargeable Cell”, <https://docs.tuyap.online/FDOCS/39736.pdf>, Aralık 29, 2021.

12. Turğut, M., “elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı ve geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük, 2018.

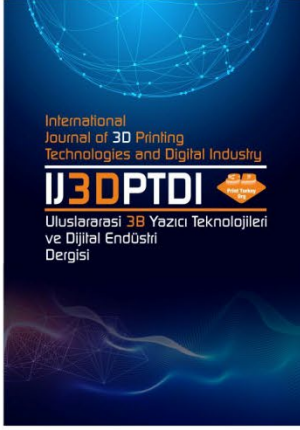
13. Anonim, “STM32F103 Blue Pill Bootloader Yükleme (Arduino)”, <https://aattk.net/stm32f103-blue-pill-bootloader-arduino/>, Ekim 18, 2019.

14. Bae, J. H., Zhiguo, B., Koo, B. J., Kim, H. R., Jang, D.G., “The CAN communication application on the BMS”, 2013 International Conference on ICT Convergence (ICTC), Pages 1140-1145, Changwon-si, 2013.

15. Kumar, K., “LM358 IC and Its Applications”, <https://www.hnhcart.com/blogs/learn/lm358-ic-and-its-applications>, Ocak 15, 2022.

16. Lee, Y., Lin, C., Farooqui, S. A., Liu, H., Ahmad, J., “Validation of a balancing model based on master-slave battery management system architecture”, Electric Power Systems Research, Vol. 214, Part A, 2023.

17. Manenti, A., Abba, A., Mareti, A., Savaresi, A. M., Geraci, A., “A New BMS Architecture Based on Cell Redundancy” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, Issue. 9, 2011.



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>

INVESTIGATING PRINTABILITY AND MECHANICAL PERFORMANCE OF 3D PRINTED RECYCLED PET WITH PLA AND TPU HYBRID ADDITIVES

Yazarlar (Authors): Kutay Çava^{ID}, Mustafa Aslan^{ID*}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çava K., Aslan M., “Investigating Printability and Mechanical Performance Of 3D Printed Recycled PET With PLA And TPU Hybrid Additives” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 252-258, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1324777

Araştırma Makale/ Research Article

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

INVESTIGATING PRINTABILITY AND MECHANICAL PERFORMANCE OF 3D PRINTED RECYCLED PET WITH PLA AND TPU HYBRID ADDITIVES

Kutay Çava^{a, b} , Mustafa Aslan^{a, b} *

^a Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgy and Material Engineering, TURKEY

^b Karadeniz Technical University, Medical Device Design and Production Application and Research Center, TURKEY

* Corresponding Author: maslan@ktu.edu.tr

(Received: 09.07.23; Revised: 29.07.23; Accepted: 15.08.23)

ABSTRACT

This paper investigates the printability and mechanical performance of 3D printed recycled PET (rPET) filaments with the incorporation of PLA and TPU blend additives. The study focuses on evaluating the tensile, flexural, and impact properties of the resulting hybrid blends. Tensile testing revealed that the neat rPET specimens exhibited average maximum tensile strength of 51.4 MPa and a tensile elasticity modulus of 3.63 GPa. The addition of PLA and TPU additives slightly reduced the tensile strength and modulus. Regarding flexural properties, the rPET specimens demonstrated an average maximum flexural stress of 43.4 MPa, indicating their ability to withstand bending forces without significant deformation. The addition of the hybrid PLA and TPU additives led to a slight reduction in flexural performance. However, the specimens still exhibited acceptable flexural strength and modulus. Furthermore, the impact test results showed a significant improvement in impact strength for the hybrid blend, with the TPU/PLA (rPET blend) exhibiting a remarkable increase (%187 and 36%) compared to the commercial and neat rPET specimens, respectively. These findings suggest that the hybrid combination of PLA and TPU additives contributes to the microstructural integrity and printability of 3D printed objects made from recycled PET filaments, thereby contributing to the advancement of sustainable manufacturing practices.

Keywords: Additive Manufacturing, Recycled PET, PLA/TPU Blend, FFF, Mechanical Properties.

1. INTRODUCTION

3D printing, also known as additive manufacturing, has revolutionized the manufacturing industry by enabling the production of complex and customized objects with ease. However, the extensive use of conventional plastic materials in 3D printing has raised concerns about environmental sustainability and the accumulation of plastic waste. In response to these concerns, the utilization of recycled PET (polyethylene terephthalate) bottles as a feedstock for 3D printing has emerged as an innovative and eco-friendly solution. Recycled PET (polyethylene terephthalate) bottles are a readily available and abundant source of plastic waste. By collecting and processing these bottles, they can be transformed into high-quality filament, which

serves as the raw material for 3D printers. This approach reduces the reliance on virgin plastic materials and helps divert plastic waste from landfills and water bodies, contributing to a more circular and sustainable economy. The utilization of recycled PET bottles in 3D printing offers several advantages. Firstly, it reduces the carbon footprint associated with traditional plastic production by avoiding the energy-intensive process of producing virgin plastic materials [1]. Secondly, it promotes the concept of upcycling, as the discarded PET bottles are transformed into valuable and functional objects through the 3D printing process. This approach aligns with the principles of the circular economy, where resources are kept in use for as long as possible. Furthermore, 3D printing with recycled PET

bottles provides designers and manufacturers with a versatile and cost-effective solution for producing a wide range of objects. The utilization of recycled PET filaments derived from plastic bottles in 3D printing represents a significant step in terms of environmental sustainability [2-3]. These filaments contribute to the reuse of plastic waste and offer numerous opportunities in various industries, including prototyping, product design, and manufacturing applications. For instance, investigations demonstrate the feasibility of utilizing 3D printing technology and recycled PET material for the cost-effective fabrication of sensors [4].

Studies have been conducted to evaluate the mechanical properties of 3D-printed parts made from recycled PET bottles. Researchers have examined parameters such as tensile strength, flexural strength, impact resistance, and elongation at break to assess the material's overall mechanical behavior. These investigations have provided valuable insights into the strengths and limitations of recycled PET as a material for 3D printing.

The mechanical properties of recycled PET filaments can vary depending on factors such as printing parameters, filament chemical composition, the quality of the recycled material, and processing methods [5]. Consequently, the mechanical performance of these filaments may exhibit differences compared to the original PET material.

PLA, a widely recognized biodegradable polymer, can be combined with TPU to create a material that exhibits exceptional shape memory properties (SMP) and improved viscosity characteristics [6]. As such, numerous scientists and scholars are focusing their efforts on the advancement of the PLA/TPU blend, which holds great potential for utilization in the field of 3D printing. As such, numerous scientists and scholars are focusing their efforts on the advancement of the PLA/TPU blend, which holds great potential for utilization in the field of 3D printing [7-8].

Research studies have investigated the impact of TPU and PLA additives on the mechanical properties of 3D-printed parts using the recycled PET filament. The incorporation of TPU improves flexibility, elasticity, and impact resistance, making it suitable for applications

that require durability and resilience. On the other hand, PLA additives enhance stiffness, dimensional stability, and heat resistance, expanding the potential uses of 3D-printed parts.

In this paper, we aim to provide a comprehensive overview of the mechanical properties of 3D-printed parts from recycled PET bottles with TPU and PLA additives. It will examine the mechanical properties, printability, and environmental implications of using recycled PET filaments in 3D printing applications. Additionally, we will show potential applications with the goal of advancing sustainable manufacturing practices and expanding the utilization of recycled materials in 3D printing technologies.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Preparation

Firstly, waste PET bottles were collected for the purpose of recycling. Following the collection of waste PET bottles, a cleaning process was conducted. This process involved removing the PET bottle packaging, adhesive labels, and caps to decontaminate them from foreign substances. Subsequently, the PET bottles were washed with water and acetone to eliminate any remaining label adhesive (Figure 1).



Figure 1. Preparation of waste PET bottles; (a) cleaned PET bottles, (b) collected waste PET bottles and (c) washed bottles.

The cleaned PET bottles were then placed in an oven above the glass transition temperature (approximately 140°C) for 4-5 hours. This allowed the residual water from the washing process to evaporate, additionally increasing the brittleness of the PET and facilitating its shredding. The dried PET bottles were shredded using a blade mill (Figure 2) for the extrusion process. Following this step, the PET surface was dried below the glass transition temperature to remove any remaining moisture. After this

process, the PET bottles were prepared to an average particle size of 4 mm for the extrusion process.



Figure 2. Blade mill shredder.

2.2. Twin Screw Extrusion

In the process, waste PET bottle particles were colorized and homogenized using a twin-screw extrusion system with an L/D ratio of 40:1. The extrusion temperature was set at 240 °C for the feed zone and 270 °C for the metering zone. The main motor speed was adjusted to 40 rpm, and under these parameters, a torque value of 28 N/m was observed during production. The polymer output from the twin-screw extruder was passed through a cooling section and directed to a granulator device, resulting in granules with an average size of 2 mm.

Subsequently, the shredded recycled PET (rPET) granules were combined with TPU and PLA polymers at a ratio of 10% each to create a polymer blend (80% rPET, 10% TPU, 10% PLA). The obtained polymer blend was further processed using a twin-screw extruder and shredded to ensure a homogeneous mixture. To minimize the moisture content within the shredded blend, a drying process was carried out in an oven at 100 °C.

2.3. Filament Production Utilizing Single-Screw Extrusion

The prepared granules were transformed into filaments with a diameter of 1.75 mm using a single-screw extrusion device. The rPET filament's interior structure is uniform, and its outward structure lacks any signs of deformation, as shown in the image below

(Figure 3). The filament extrusion process, the preheating temperatures of the extruder, and the output nozzle, as well as the extrusion speed, significantly affect the quality and diameter of the filament. In particular, the temperature influences the surface quality, porosity, and structure of the filament [9]. In this context, the preheating and output temperatures of the single-screw extrusion device were optimized to be 255 °C and 265 °C, respectively, while the extrusion speed was set between 80-100 rpm, maintaining a head pressure of 2 bar.

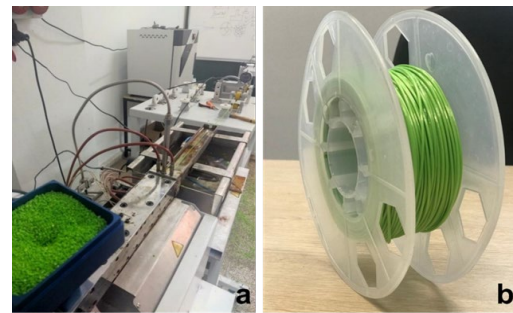


Figure 3. Filament production process; (a) single-screw extrusion, and (b) the resulting filament.

2.4. Mechanical Tests

In this study, tensile, flexural, and impact tests were conducted to determine the mechanical properties of filaments produced from the neat rPET and a blend of 10% TPU, 10% PLA, and 80% recycled PET (rPET blend). The tensile, flexural, and impact specimens were designed using the CAD program SolidWorks, according to the ISO 527 1A, ISO 178, and ISO 179 standards, respectively. Subsequently, the designs were converted to the STL (Standard Triangle Language) format for transfer to the slicer program. Printing parameters, such as printing temperature, bed temperature, printing speed, etc., were adjusted using the slicer program Cura (Table 1). The infill direction parameter in 3D printing has been chosen as 0° according to the printer bed in order to be parallel to the tensile direction during the tensile testing. The filaments were then printed using a Creality brand CR6SE model FFF-type printer. Three prints were on each specimen type for tensile, bending, and impact tests (Figure 4).

Table 1. Printing parameters of filaments

Parameter	Unit	Value
Nozzle Temperature	°C	255
Bed Temperature	°C	80
Layer Thickness	mm	0.1

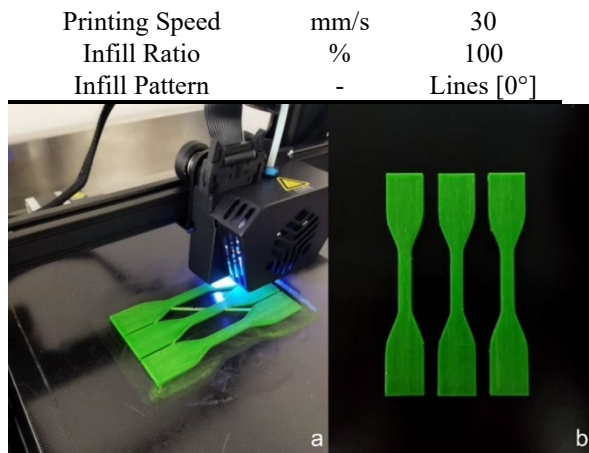


Figure 4. Preparation of tensile test specimens; (a) during printing, and (b) printed specimens.

Tensile tests, in accordance with ISO 527 standards, were performed on the MTS Model 45 Universal Testing Machine at a speed of 5 mm/min for the tensile specimens. Flexural specimens were tested on the same device at a crosshead speed of 10 mm/min, following the ISO 179 standard for flexural properties. The impact strength of the specimens was evaluated using an Instron Charpy impact testing machine with a 50 J capacity (Figure 5c).

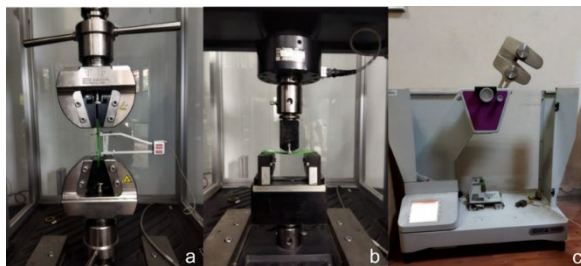


Figure 5. Mechanical tests; (a) tensile test, (b) 3-point bending, and (c) impact test.

3. RESULTS

3.1. Tensile Test

The stress-strain curves obtained from the tensile tests are illustrated in Figure 6.

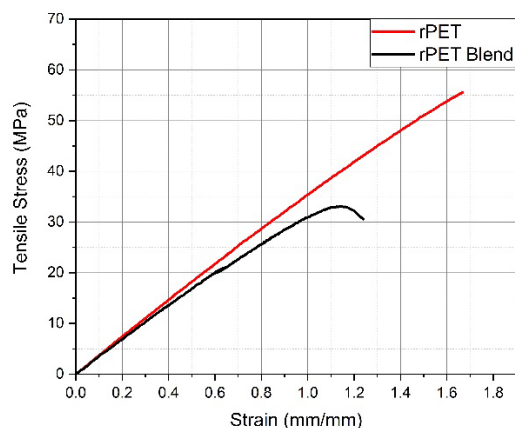


Figure 6. The representative stress-strain curves of tension test.

Upon examination of the results, it was observed that the addition of TPU and PLA additives to the neat recycled PET filament resulted in a reduction in both the tensile strength and elastic modulus of the material.

The rPET specimens exhibited an average maximum tensile strength of 51.4 ± 3.6 MPa, indicating that the recycled PET filaments possess good tensile strength. This suggests their potential suitability for applications requiring structural integrity, where the material needs to withstand significant tensile forces.

In terms of the tensile elasticity modulus, the rPET specimens displayed a value of 3.63 ± 0.85 GPa. This modulus value suggests that the recycled PET filaments possess a reasonable level of stiffness and are capable of resisting deformation under applied tensile stress. This characteristic is crucial for maintaining the shape and structural integrity of printed objects when subjected to tensile loads.

When comparing these results with prior studies, Helen et al. [10] utilized recycled PET bottles to produce tensile specimens using a 3D printer and reported an average maximum tensile stress of 20.35 MPa for their specimens. Van de et al. [5] investigated the mechanical properties of recycled PET filaments at different crystallinity levels and various production parameters. They achieved the highest tensile stress of 46.43 MPa among the specimens printed using different production parameters. In another study by Saidi et al. [11], the effect of adding polybutylene terephthalate (PBT) to recycled PET at different ratios on its mechanical properties was examined. The maximum tensile stress for neat rPET was determined as 60.6 MPa, with a modulus of elasticity of 1.09 GPa. It was noted that the addition of PBT resulted in lower tensile strength compared to neat PET.

3.2. Flexural Testing

The stress-strain curves obtained from the three-point flexural tests are summarized in Figure 7. It is evident that the addition of TPU and PLA additives led to a decrease in the maximum flexural strength and flexural modulus.

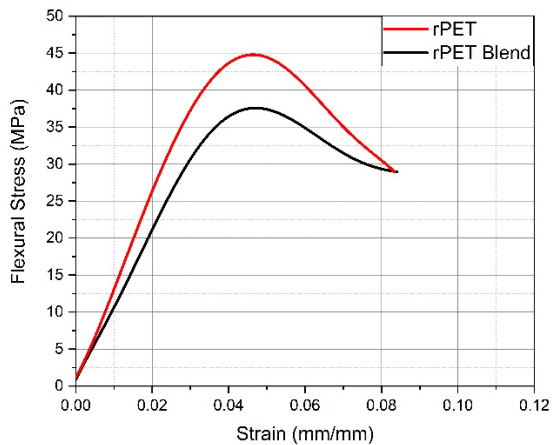


Figure 7. Representative flexural stress strain curves of three-point bending test

The rPET specimens demonstrated an average maximum flexural stress of 43.36 ± 0.65 MPa, indicating their ability to withstand bending forces without significant deformation. The flexural elasticity modulus of the rPET specimens was measured at 1.22 ± 0.12 GPa,

reflecting their resistance to bending and ability to maintain shape under applied flexural loads.

Comparing these results with the available literature, specific values for the flexural properties of recycled PET filaments with TPU and PLA additives are not directly provided in the mentioned studies. However, it is worth noting that the flexural properties of polymer composites can vary based on several factors, including the composition of the material, processing parameters, and specimen geometry.

In the context of the present study, the addition of TPU and PLA additives in the rPET blend specimens resulted in a slightly lower average maximum flexural stress of 35.42 ± 0.89 MPa, indicating a reduction in flexural strength compared to the neat rPET specimens. Similarly, the flexural elasticity modulus of the rPET blend specimens was measured at 1.01 ± 0.07 GPa, reflecting a slight decrease compared to the rPET specimens.

Table 2. Summarized mechanical properties obtained from tensile and flexural tests.

	Max. Tensile Strength (MPa)	Elasticity Modulus (GPa)	Max. Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)
Commercial rPET[12]	57	2.3	-	-
rPET	54 ± 4	3.6 ± 0.9	43 ± 1	1.2 ± 0.1
rPET Blend	31 ± 2	3.1 ± 0.3	35 ± 1	1.0 ± 0.1

The results obtained from the tensile and flexural tests provide insights into the mechanical properties of the specimens. Comparatively, the rPET blend specimens, which contained 80% recycled PET and 10% each of TPU and PLA additives, exhibited a lower average maximum tensile strength of 30.8 ± 2.23 MPa. This reduction in tensile strength might be attributed to the incorporation of additives, which could affect the overall structural integrity of the material.

However, it is noteworthy that the rPET blend specimens still exhibited reasonable tensile strength values, albeit lower than the rPET specimens but with higher elasticity values than commercial rPET (OnePET, Filamentum). This suggests that the hybrid combination of

recycled PET with TPU and PLA additives can still provide a level of strength suitable for certain applications.

Overall, the results indicate that while the incorporation of TPU and PLA additives slightly affected the tensile and flexural properties of the recycled PET filaments, the hybrid combination, which still demonstrated acceptable mechanical performance. These findings suggest the potential of using recycled PET filaments with TPU and PLA additives in 3D printing applications where lower strength requirements are needed.

3.3. Impact Test

The impact test results according to ISO 179 standards are presented in Table 3, showcasing

the impact strength of the specimens. A notable observation from the table is the significant increase in impact strength exhibited by the TPU/PLA mixture samples (rPET blend) compared to both the commercial rPET and the neat rPET specimens.

Table 3. Charpy impact test results

Specimens	Re (kJ/m ²)	Standard Deviation
Commerical rPET	3.9	-
rPET	8.2	1.6
rPET Blend	11.2	1.1

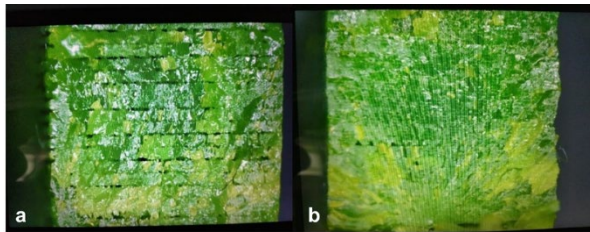


Figure 8. Fracture surfaces of (a) neat rPET and (b) rPET blend impact test specimens

The rPET blend specimens demonstrated an impact strength of 11.2 kJ/m², which is significantly higher than that of the commercial rPET (3.9 kJ/m²) and the neat rPET (8.2 kJ/m²). This result indicates a remarkable increase of 187% and 36% in impact strength for the PLA/TPU mixture samples compared to the commercial rPET and neat rPET specimens, respectively. Moreover, the optical images provided in Figure 8 illustrate the fracture surfaces of the impact specimens. These images likely depict the microstructural integrity of the materials and can potentially offer visual evidence supporting the higher impact results achieved by the rPET blend specimens (Figure 8).

4. CONCLUSION

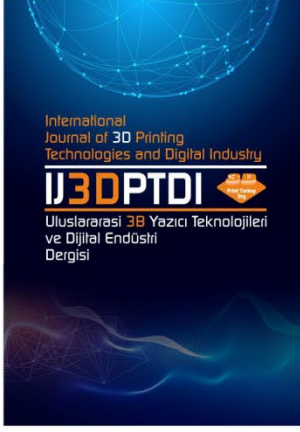
In conclusion, this study investigated the printability and mechanical performance of 3D-printed recycled PET filaments with PLA and TPU hybrid additives. The findings indicate that the addition of PLA and TPU additives influenced the mechanical properties of the resulting hybrid materials. While there was a slight reduction in tensile and flexural properties compared to the neat rPET specimens, the rPET specimens still exhibited good mechanical performance, suggesting their potential suitability for applications requiring

structural integrity. The incorporation of PLA and TPU additives contributed to the microstructural integrity of the specimens, resulting in improved impact resistance with a significant 36% increase in impact strength compared to the neat rPET specimens. These results highlight the potential of utilizing a PLA and TPU hybrid combination to enhance the mechanical properties of 3D printed objects made from recycled PET filaments. By leveraging these hybrid additives, it is possible to improve the overall performance of recycled PET filaments while promoting sustainability in manufacturing processes. Future research could explore further optimization of the hybrid composition and investigate the influence of printing parameters on the printability and mechanical properties of the hybrid materials.

REFERENCES

1. J. Zheng and S. Suh, "Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 9, Issue. 5, Pages 374–378, 2019.
2. N. R. Madhu, H. Erfani, S. Jadoun, M. Amir, Y. Thiagarajan, and N. P. S. Chauhan, "Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 122, Issue. 5–6, Pages 2125–2138, 2022.
3. V. Mishra, S. Negi, and S. Kar, "FDM-based additive manufacturing of recycled thermoplastics and associated composites," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 25, Issue. 2, Pages 758–784, 2023.
4. R. Singh et al., "On 3D printing of low-cost sensors using recycled PET," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 47, Issue. 4, 2022.
5. B. Van de Voorde et al., "Effect of extrusion and fused filament fabrication processing parameters of recycled poly(ethylene terephthalate) on the crystallinity and mechanical properties," *Addit. Manuf.*, vol. 50, Issue. November 2021, Pages 102518, 2022.
6. D. Rahmatabadi, I. Ghasemi, M. Baniassadi, K. Abrinia, and M. Baghani, "3D printing of PLA-TPU with different component ratios: Fracture toughness, mechanical properties, and morphology," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 21, Pages 3970–3981, 2022.
7. Z. C. Kennedy and J. F. Christ, "Printing polymer blends through in situ active mixing during fused filament fabrication," *Addit. Manuf.*, vol. 36, Issue. May, Pages 101233, 2020.

8. T. Shou et al., “Biobased and Recyclable Polyurethane for Room-Temperature Damping and Three-Dimensional Printing,” ACS Omega, vol. 6, Issue. 44, Pages 30003–30011, 2021.
9. H. K. Sezer, O. Eren, H. R. Börklü, and V. Özdemir, “Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Ergiyik Biriktirme Yöntemi Ile Eklemeli Imalatı: Fiber Oranı Ve Yazdırma Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi,” Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg., Cilt 2018, Sayı 2018, Sayfa 663–674, 2018.
10. H. A. Little, N. G. Tanikella, M. J. Reich, M. J. Fiedler, S. L. Snabes, and J. M. Pearce, “Towards distributed recycling with additive manufacturing of PET flake feedstocks,” Materials (Basel)., vol. 13, Issue. 19, 2020.
11. M. A. A. Saidi, A. Hassan, M. U. Wahit, L. J. Choy, and H. Anuar, “Thermal, dynamic mechanical analysis and mechanical properties of polybutylene terephthalate/polyethylene terephthalate blends,” J. Teknol., vol. 82, Issue. 5, Pages 73–83, 2020.
12. One PET 3d printer filament, TDS report, <https://www.filamentive.com/product-category/one-pet/> June 03, 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>

TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLERDE ISIL PERFORMANSIN DENEYSSEL İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL
PERFORMANCE IN THERMOELECTRIC GENERATORS

Yazarlar (Authors): Mustafa ASKER^{ID*}, İsmail BOGREKCI^{ID}, Pinar DEMIRCIOGLU^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Asker M., Bogrekci I., Demircioglu P., "Termoelektrik Jeneratörlerde Isıl Performansın Deneysel İncelenmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 259-267, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1250308

Araştırma Makale/ Research Article

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

TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE ISIL PERFORMANSIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa ASKER^a , İsmail BOGREKCI^a , Pinar DEMIRCIOGLU^a 

^a Aydın Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Aydın, TURKEY

* Corresponding Author: mustafa.asker@adu.edu.tr

(Received: 12.02.23; Revised: 21.06.23; Accepted: 08.08.23)

ÖZ

Termoelektrik modüller (TEM), ısı enerji yönetimi ve sera gazı emisyonunu azaltma konusunda büyük potansiyele sahip ve uygulanabilir teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir. Termoelektrik modüller (TEM) yarıiletken malzemelerden oluşup, elektrik kullanarak ısıtma veya soğutma yapabilirler. Bunun tersi olarak da sıcaklık farkını kullanarak elektrik üretebilirler. Termoelektrik modüller elektriksel olarak seri, termal olaraksa paralel bağlıdırlar. TEM çalışma prensiplerine göre termoelektrik jeneratör ve termoelektrik soğutucu olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Bu araştırmada, termoelektrik jeneratör (TEG) kullanarak bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda tüm TEG yüzeyi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, deneysel çalışmada iki farklı durum için (TEG+ ısı emici ve Sadece TEG) incelenmiştir. TEG'in sıcak tarafı elektrikli ısıtıcıya bağlanmıştır. Isı emici ise soğuk tarafa yerleştirilmiştir. Termal kamera kullanarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, TEG ve ısı emici olduğu durum için sistemin performansı %60 arttığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı Geri Kazanımı, Termoelektrik Jeneratör, Termal Kamera.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE IN THERMOELECTRIC GENERATORS

ABSTRACT

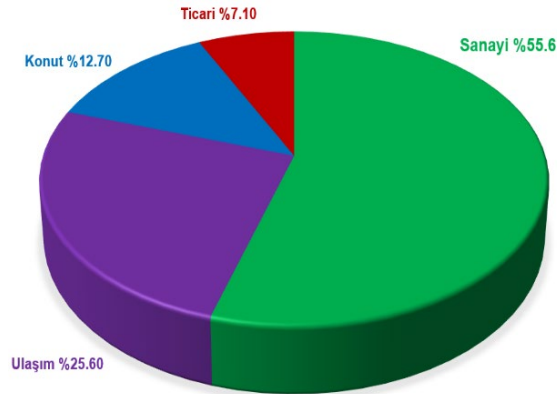
Thermoelectric modules (TEM) are recognized as one of the viable technologies with great potential for thermal energy management and greenhouse gas emission reduction. Thermoelectric modules (TEM) are composed of semiconductor materials and can heat or cool using electricity. Conversely, they can generate electricity using the temperature difference. Thermoelectric modules are electrically connected in series and thermally connected in parallel. They are divided into two groups as thermoelectric generator and thermoelectric cooler according to their working principles. In this research, an experimental setup was created using a thermoelectric generator (TEG). In the experimental studies, the analysis was carried out using the entire TEG surface. In addition, two different cases (TEG + heat sink and TEG only) were investigated in the experimental study. The hot side of the TEG is connected to the electric heater. The heat sink was placed on the cold side. The temperature was measured using a thermal camera. According to the results obtained, it was shown that the performance of the system increased by 60% for the case with TEG and heat sink.

Keywords: Heat Recovery, Thermoelectric Generator, Thermal Camera.

1. GİRİŞ

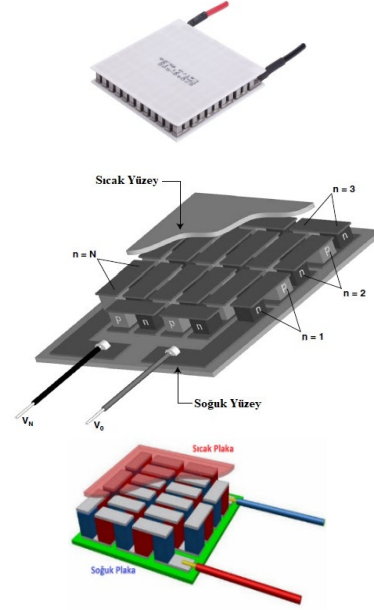
Son yıllarda, insan faaliyetleri ve sanayi sektörlerindeki enerjiye olan talep artmıştır. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü karşılayan fosil yakıtların tüketiminde çok büyük bir artış yaşanmıştır. Bu nedenle konuyla ilgilenen araştırmacılar, temiz, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları bulmaya ve enerji kaynaklarını daha verimli olarak kullanmaya yönelmişlerdir. Nüfus sayısının hızlı bir şekilde artması ile birlikte enerji gereksinimi belirli bir seviyenin üzerine çıkmıştır.

Dünyadaki enerji kaynaklarını korumak ve enerjiyi daha uygun bir şekilde kullanmak için bilim insanları ve araştırmacıları büyük bir çaba harcamaktadır. Buna ek olarak, fosil yakıtların tükenmesi ve bu tür yakıtların çevreye verdiği zarardan dolayı yenilenebilir enerji kaynakları kullanımında, termoelektrik modüller (TEM) büyük bir önem taşımaktadır. Enerji Tüketiminin Sektörel Dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 2017 yılı için Sektörel Enerji Kullanımının Yüzdeleri [1].

Kablosuz iletişim ve ağ teknolojisi, insan toplumunun yaşam tarzını ve üretkenliğini geliştirmiştir. Mobil terminaller, veri merkezleri ve bulut bilişim gibi kablosuz iletişim hizmetleri ve veri işleme, insan toplumuna kapsamlı bir bilgi kaynağı sağlamıştır. Termoelektrik modülü, doğrudan ısı enerjisini elektrik enerjisine (veya tersini yapmak) dönüştürmektedir. Termoelektrik modülün genel görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir [2-3]. Termoelektrik modüller (TEM), Termoelektrik jeneratörler ve Termoelektrik soğutucular olarak iki farklı grupta sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2. Termoelektrik modülün genel görünümü verilmiştir [2-3].

Termoelektrik modüller (TEM), ısı özellikleri iyi olan iki farklı yarı iletken malzemeden oluşmaktadır. Bir yüzeyi P-tipi yarı iletken malzemeden, diğer yüzeyi ise N-tipi yarı iletken malzemeden üretilmektedir. TEM; elektriksel olarak birbirine seri bağlantı ile ve ısı olarak paralel bağlantı ile bağlıdır. Böylece daha yüksek voltaj elde edilmektedir [4].

TEM'lerinin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları; TEM'in yapısı basittir, güvenilirdir ve sessiz çalışmaktadır. Buna ek olarak, hareketli parçalar içermemektedir. Dezavantajları ise; TEM'in verimlilikleri düşük olmaktadır.

TEM'ler, ısının atıldığı sistemlerdeki atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılabilir. Örneğin, endüstriyel tesislerde veya araç egzozlarında oluşan atık ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için TEG'ler kullanılabilirler.

TEM malzemeleri, uygulamaları, modelleme teknikleri ve performans iyileştirmeleri ile ilgili çok sayıda araştırmacı tarafından kapsamlı bir inceleme yapılmıştır [5-6].

Çalışma konusu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların bazıları aşağıda yer almaktadır. Hodes tarafından yapılan bir çalışmada, termoelektrik modüller için bir boyutlu sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çözümde, farklı çalışma şartları altında analizler yapılmıştır [7].

Termoelektrik jeneratörlerin analitik çözümü, Esarte ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmanın amacı, içten yanmalı motorun egzozundan çıkan enerjiden faydalanmaktır. Akışkanın hızı, ısı değiştirici geometrisi, akışkanın özellikleri ve giriş sıcaklıkları gibi parametrelerinin sistemin ısıl performansı üzerine etkisi incelenmiştir [8].

Astrain ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ısı değiştiricilerin sıcak ve soğuk taraftaki ısıl dirençlerinin termoelektrik jeneratörler üzerine sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada, sonlu farklar yöntemi kullanılarak sisteminin ısıl performansı analiz edilmiştir. Sayısal analizler, geliştirilen prototip sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Isıl direncin %10 azaltılması durumunda, elektrik üretiminin %8'lik artışı gösterilmiştir [9].

Hsu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, otomobil egzoz borusundan çıkan atık ısıları elektrik enerjisine dönüştürmek için 24 adet termoelektrik jeneratörden oluşan bir sistem geliştirilmiştir. Yapılan deneysel ve simülasyon sonuçlarında, araçlarda kullanılan termoelektrik jeneratörlerin performansında iyileştirmeler yapılmıştır. Buna ek olarak, motor hızı 3500 devre/dakika yükseldiği zaman, 12.4 Watt'lık bir güç elde edilmiştir [10].

David ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, iki farklı termoelektrik modülü mini kanal ısı yutucuya (heat sink) bağlanarak, optimizasyon ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Kanaldaki ısı transfer akışkanı su olarak alınmıştır. Kanal sayısı, çapı ve debi gibi parametreler, farklı çalışma şartlarında analizler edilmiştir [11].

Date ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, küçük ve orta ölçekli sistemler için yenilenebilir enerji sistemlerinden faydalanarak termoelektrik güç üretiminin geliştirilmesi ile ilgili bir araştırma yapılmıştır. Buna ek olarak, enerji üretiminde kullanılan yeni malzemeler ve yenilikçi tekniklerinden bahsedilmiştir [12].

Matsumoto ve arkadaşları, içten yanmalı bir motordan çıkan sıcak egzoz gazından elektrik enerjisi elde etmek için TEG kullanmışlardır [13].

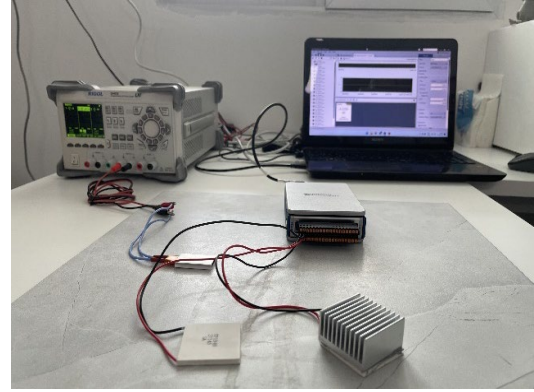
Bu çalışmanın temel amacı, Termoelektrik jeneratörlerin deneysel olarak incelenmesi.

Buna ek olarak, Termoelektrik jeneratörlerin verimliliklerinin artırılması için ısı emici (Heat sink) kullanıldığı zaman sistem üzerine olan etkisinin araştırılmasıdır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Düzeninin Oluşturulması

Bu deneysel çalışma kapsamında, Termoelektrik jeneratörlerin ısıl verimliliğini incelemek için deney düzeni oluşturulmuştur. Deney düzeninin ana elemanları Şekil 3'te verilmiştir. Deney düzeni, termoelektrik jeneratörleri (TEG), ayarlanabilir güç kaynağı, data kazanım kartı, elektrikli ısı kaynağı, ısı emici (Heat sink), termal kamera ve bilgisayar sistemi elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3. Deneysel düzeninin genel yapısı.

Termal bağlantıların doğru bir şekilde yapılması da TEG'in performansını etkilemektedir. Termoelektrik malzeme ile ısı kaynağı ve ısı emiciler arasındaki termal bağlantıların düşük termal dirençli olması önemlidir. İyi bir termal bağlantı, sıcaklık gradyanını maksimize ederek jeneratörün verimliliğini artırmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve ilgili detaylı özellikleri aşağıdaki gibidir.

2.1.1. Termoelektrik Jeneratörleri (TEG)

TEG SP1848-27145 tipi Termoelektrik jeneratörü kullanılmıştır (Şekil 4). Soğuk taraf üzerinde olan yazı, sıcak taraf ise üzerinde yazı olmayan taraf olarak gösterilmiştir. Bu tip TEG ler aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- 1-Enerji üretimi için özel olarak tasarlanmıştır
- 2-Neme karşı korumak için kapalı
- 3-Yüksek güvenilirlik ve çevreye kirlilik vermemektedir.

Bu TEG'lerin bazı özellikleri ise aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Boyut: $4 \times 4 \times 0.34$ cm (UxGxY)
- İletkenlik: $850 \sim 1250 \Omega \cdot 1 \cdot \text{cm}^{-1}$
- Optimum (Z) değeri : $2.5 \sim 3 \times 10^{-3} \text{W}/^\circ\text{C}$
- Isıl iletkenlik (K): $15 \sim 16 \times 10^{-3} \text{W}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm}$
- Çalışma sıcaklığı : $-60 \sim 125^\circ\text{C}$
- Malzeme: Ceramic / Bismuth Telluride
- Ağırlık: 25g
- Kablo uzunluğu: yaklaşık 30 cm



Şekil 4. TEG SP1848-27145 tipi Termoelektrik jeneratörün genel görünümü.

2.1.2. Ayarlanabilir Güç Kaynağı

Deneyisel çalışmada, Rigol DP832, 3 farklı çıkışlı, programlanabilir, temiz çıkış gücü verebilen ve max. toplam güç 195W, çok sayıda bağlantı portunu bulunduran yüksek kaliteli bir Laboratuvar tipi ayarlanabilir DC Güç kaynağı kullanılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna ek olarak, güç kaynağının diğer teknik özellikleri ise 0-30V / 0-3A dijital (D.C.) doğru akım sağlamaktadır.



Şekil 5. Rigol DP832 Ayarlanabilir Güç Kaynağı.

2.1.3. Data Kazanım Kartı

National Instrument NI 9220 data kazanım kart ve ekipmanları deneyisel çalışmada kullanılmıştır (Şekil 6). NI 9220 teknik özellikleri aşağıdaki gibidir. NI 9220 analog girişli bir modül ve 16 diferentia kanala sahiptir. Bu ek olarak, Sinyal seviyesi $\pm 10\text{V}$, örnekleme hızı 100kS/s ve çözünürlük 12-Bit olarak üretici tarafından tasarlanmıştır.



Şekil 6. NI 9220 data kazanım kartının görünümü.

2.1.4. Elektrikli Isı Kaynağı

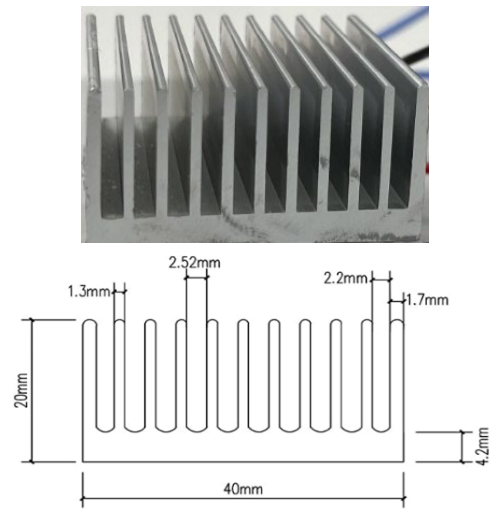
Elektrikli Isı kaynağının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 8). PTC Isıtma Plakası AC DC 12V, Termostatik Alüminyum Kabuk Seramik Isıtma Plakaları Levha Sabit Sıcaklık Isıtıcı sıcaklık 110°C , 3-10W.



Şekil 7. Elektrikli ısı kaynağı.

2.1.5. Isı Emici (Heat Sink)

Isıyı çekmek için termoelektrik modülün üzerine $40 \times 40 \times 20 \text{mm}^3$ ölçülerinde alüminyum malzemesinden imalat edilen (Gpu Heatsink Kit) tipi ısı emmici kullanılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Isı emici (Heat sink).

2.1.6. Termal Kamera

Bu çalışma kapsamında Testo 885 - Termal kamera kullanılmıştır. 76,800 sıcaklık ölçüm noktasına sahip ile yüksek kalitede ısı görüntüleri sağlayan termal kameranın boyutu 253mm × 132mm × 111 mm ve 1570g ağırlıkta olan termal kamera kullanılmıştır (Şekil 9). Termal kameranın teknik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Termal kameranın teknik özellikleri

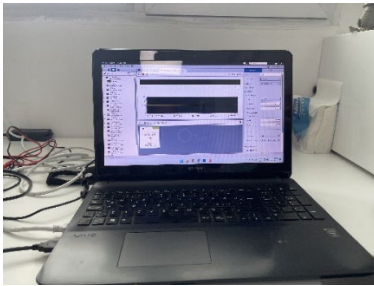
Parametre	Özellik
Ekran	4,3" LCD, 640 × 480
Çalışma sıcaklığı	-15/+50 °C
Isıl duyarlılık	< 30 mK +30 °C de
Ölçüm aralığı	-30/+350 °C
Doğruluk	±2 °C için ±2%



Şekil 9. Termal kamera (Testo 885).

2.1.7. Dizüstü Bilgisayar

NI den gelen verileri bilgisayara aktarılabilmektedir. Bu deneysel çalışmada, dizüstü bilgisayar kullanılmıştır (Şekil 10). Bilgisayarın özelliği, işlemci: Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU @ 1.60GHz; Ram 8.00 GB



Şekil 10. Dizüstü bilgisayar.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Isı emici ve Termoelektrik Jeneratör (TEG) farklı bileşenlerdir ve birbirleriyle bağımsız olarak çalışabilirler..

TEG'ler termoelektrik etkiyi kullanarak, bir yüzeydeki yüksek sıcaklıkla diğer yüzeydeki

düşük sıcaklık arasındaki termoelektrik farkı kullanılarak elektrik üretir.

Bazı uygulamalarda ise hem bir ısı emici hem de TEG bir arada kullanılabilir. Örneğin, bir enerji geri kazanım sistemi, bir ısı emici kullanarak sistemden atılan atık ısıyı emerek ve bu ısıyı TEG ile elektrik enerjisine dönüştürerek enerji verimliliğini artırabilir. Bu şekilde, ısı emici ve TEG birlikte çalışarak enerji geri kazanımı sağlanmış olur. Ancak, genel olarak, ısı emici ve TEG ayrı ayrı veya farklı uygulamalarda kullanılır ve birbirlerine bağımlı değildir.

Termoelektrik jeneratör sistemine ait deney düzeneği Şekil 3'te gösterilmiştir. Deney düzeneği kısaca 1-Termoelektrik jeneratörleri (TEG), 2-Ayarlanabilir Güç Kaynağı (Rigol DP832) 3-National Instrument NI 9220 tipi data kazanım kartı, 4-Elektrikli ısı kaynağı (PTC Heating Plate AC DC 12V), 5-Isı emici (Heat sink) (40×40×20 mm³ ölçülerinde ve Alüminyum malzemesinden imalat edilmiştir.), ve 6-Bilgisayar elemanlarından oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında iki farklı durum için deneysel çalışma yapılmıştır.

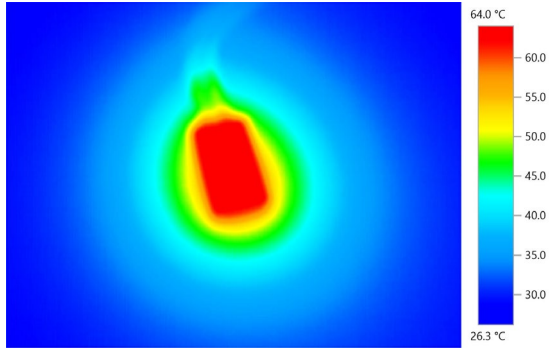
1-“TEG+Isı emici” durumu için

2-“Sadece TEG” ısı emici olmadığı durum için

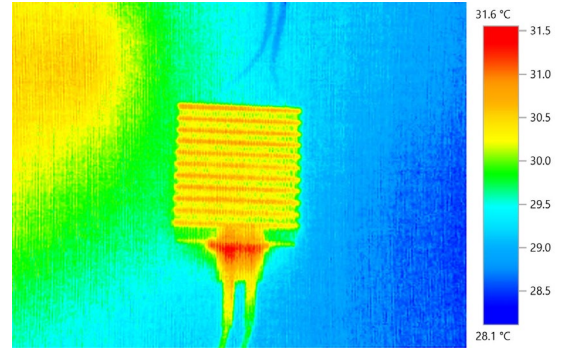
Deney testlerine başlamadan önce, elektrikli ısıtıcının sıcaklığı Testo 885 tipi termal kamera kullanarak ölçülmüştür. Güç kaynağının voltajları değiştirilerek elektrikli ısıtıcının sıcaklığı değiştirilebilmektedir. Güç kaynağından farklı voltajlar için (3V, 6V, 9V ve 12V) elektrikli ısıtıcının sıcaklığı sırasıyla (64°C, 83.4°C, 107.5°C ve 119.5°C) olarak bulunmuştur. Farklı voltajdaki ısıtıcı sıcaklıkları termal kamera kullanarak bulunmuş ve Şekil 11'de gösterilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada, TEG ile birlikte ısı emici olduğu durum için analizler yapılmıştır. Burada ısı emiciyi TEG soğuk taraf üzerine yerleştirilmiş, güç kaynağından voltajlar değiştirilerek (3V, 6V, 9V ve 12V) sıcaklık dağılımı elde edilmiş ve Şekil 12'de gösterilmiştir.

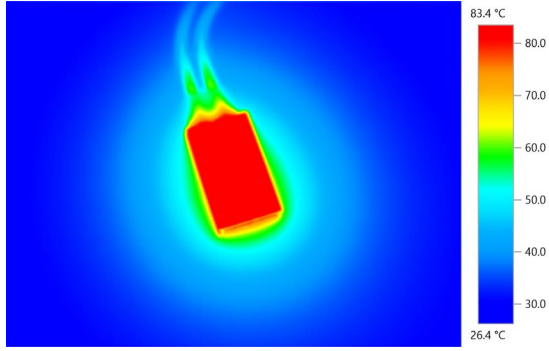
Isı emici olmadığı durumda ise (Sadece TEG) farklı voltajlar için (3V, 6V, 9V ve 12V) sıcaklık dağılımı Şekil 13'te verilmiştir.



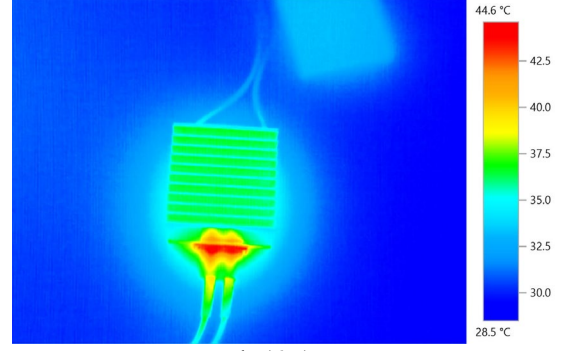
a-(3V)



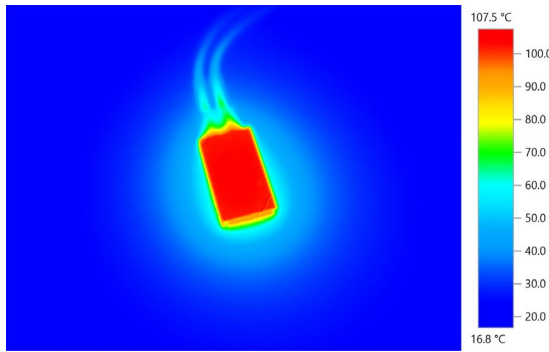
a-(3V)



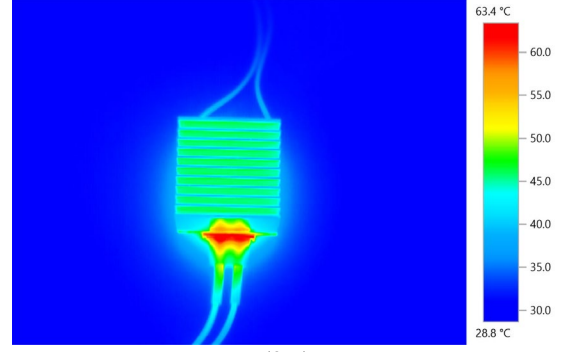
b-(6V)



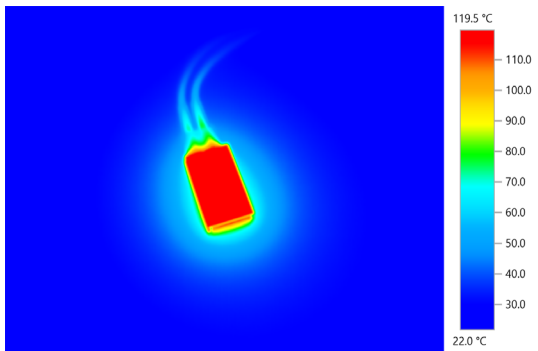
b-(6V)



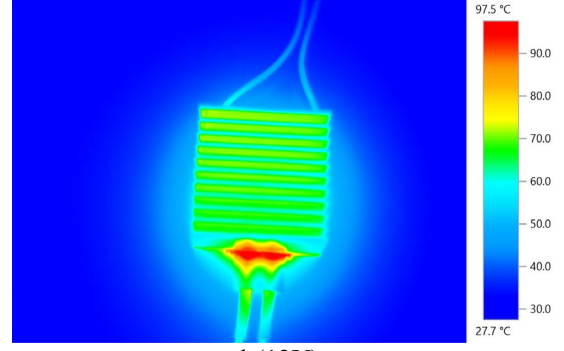
c-(9V)



c-(9V)



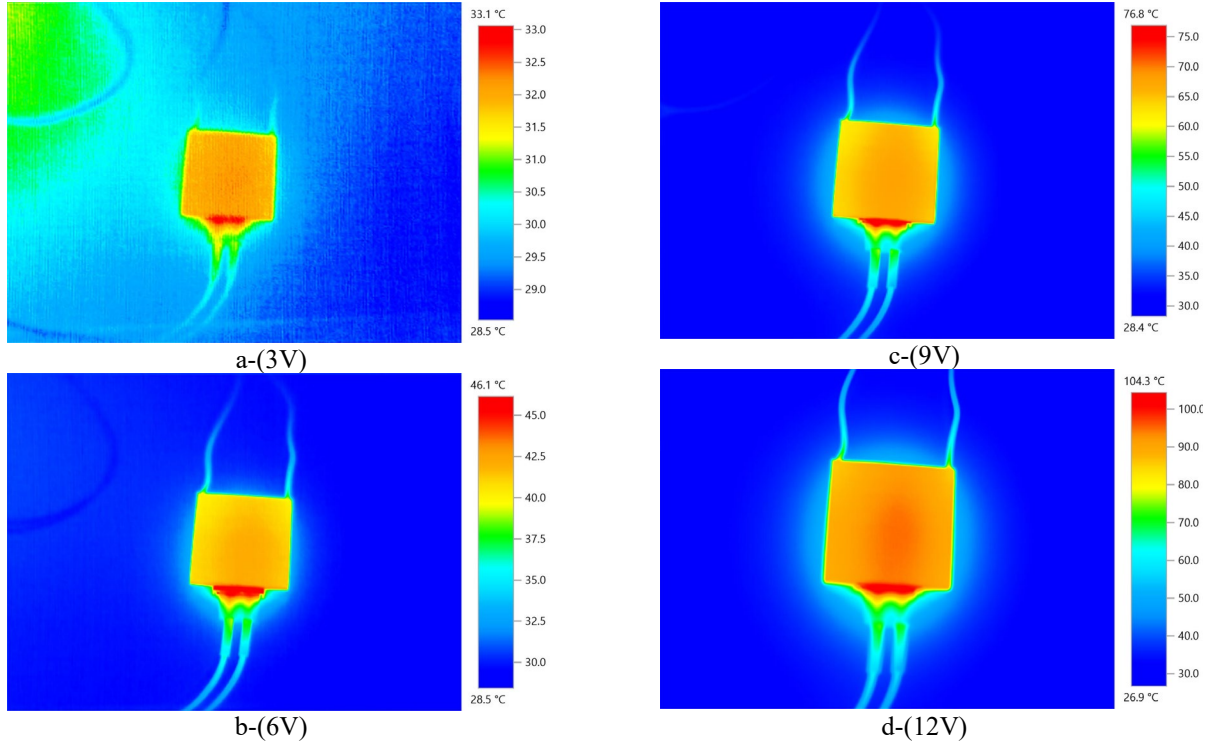
d-(12V)



d-(12V)

Şekil 11. Farklı voltajlardaki elektrikli ısıtıcının sıcaklıkları.

Şekil 12. Isı emici olduğu durum için sıcaklık dağılımı.



Şekil 13. Sadece TEG durumu için sıcaklık dağılımı

Yüzey sıcaklığı değerleri iki farklı durum için (TEG+ısı emici ve sadece TEG) Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. İki farklı sistem için sıcaklık değerleri.

Voltaj	Sıcaklık (°C)	
	Isı emici durumu için	Isı emici olmadığı durum için
3 V	30.5	32.1
6 V	36.5	42.1
9 V	45.9	67.9
12 V	69.9	94.5

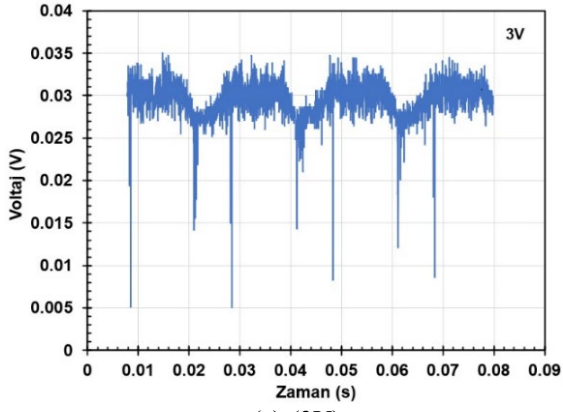
Burada iki durum için voltajlar arttırıldığı zaman yüzey sıcaklığı artmıştır. Ancak ısı emici olduğu durumu için yüzey sıcaklığı daha az olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi ise ısı emicinin temel işlevi olarak ısıyı azaltmak ve temas ettiği yüzeyden ısıyı gidermektir. TEG+ısı emici olduğu durum için sistem olarak voltajları ölçülmüştür. Güç kaynağından voltajlar değiştirerek (3V, 6V, 9V ve 12V), sensör vastasıyla TEG’den ölçülen voltaj değeri ısı emici olduğu durum için Şekil 14’de gösterilmiştir.

Burada, güç kaynağının voltajı (3V) olarak olduğu durumda sistemin voltajı yaklaşık olarak 0.03V değerindeyken, güç kaynağının voltajı (12V) olarak olduğu durumda sistemin voltajı yaklaşık olarak (0.6V) olduğunu Şekil 14’te verilmiştir. Bunun sebebi ise ayarlanabilir güç kaynağının voltajı arttığı zaman elektrikli ısıtıcının sıcaklığı artmaktadır. Buna göre

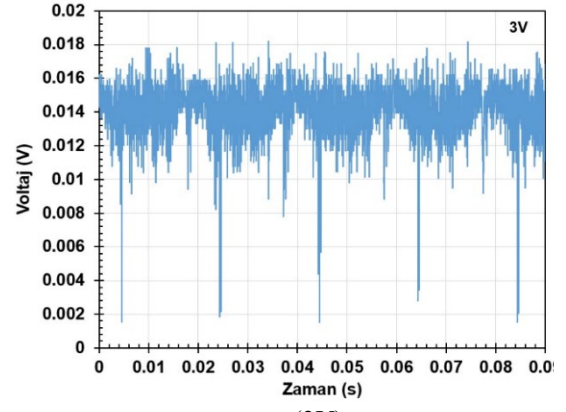
sıcaklık farkı oluştuğu zaman sistemin gücü (voltaj) yükseliyor.

Isı emici olmadığı durum için (sadece TEG), güç kaynağından voltajlar değiştirerek (3V, 6V, 9V ve 12V), sensör vastasıyla TEG’den ölçülen voltaj değeri Şekil 15’te gösterilmiştir.

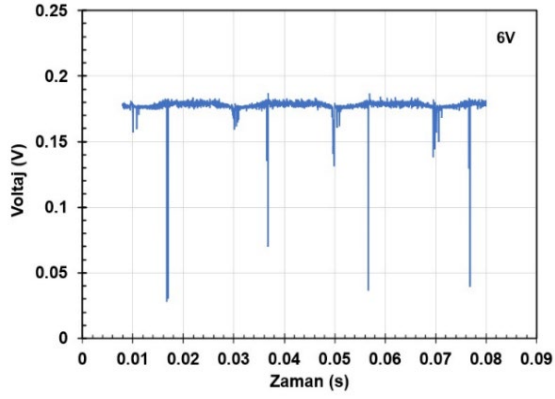
Benzer şekilde Güç kaynağından voltaj arttığı zaman sistemin (TEG) voltajı artmaktadır. Burada, güç kaynağının voltajı (3V) olarak olduğu durumda sistemin voltajı yaklaşık olarak (0.015V) değerindeyken, güç kaynağının voltajı (12V) olarak olduğu durumda sistemin voltajı yaklaşık olarak (0.23V) olduğunu Şekil 19’da verilmiştir. TEG ve ısı emici olduğu durumda sistemin daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Bunu sebebi ise TEG’in sıcak ve soğuk taraf arasındaki sıcaklık farkı ile doğrudan orantılıdır.



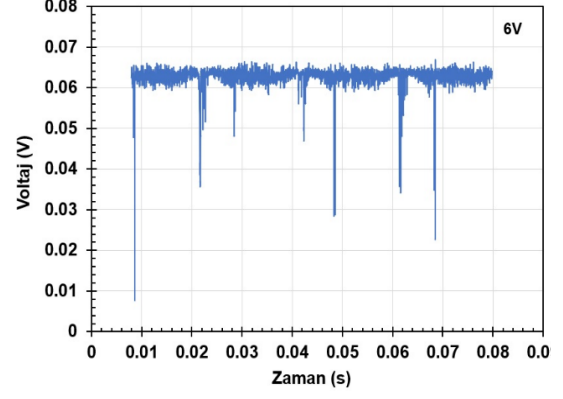
(a)-(3V)



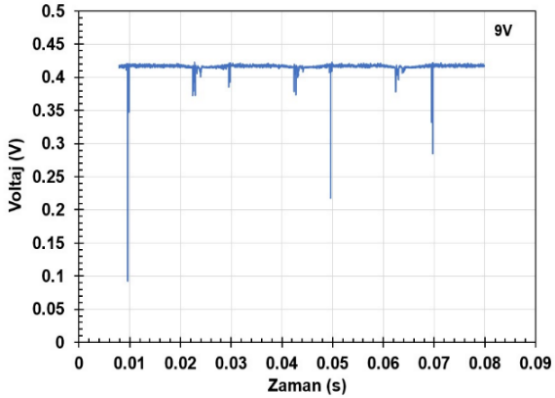
a-(3V)



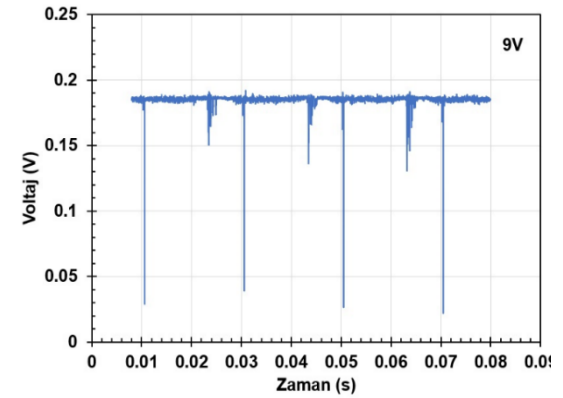
b-(6V)



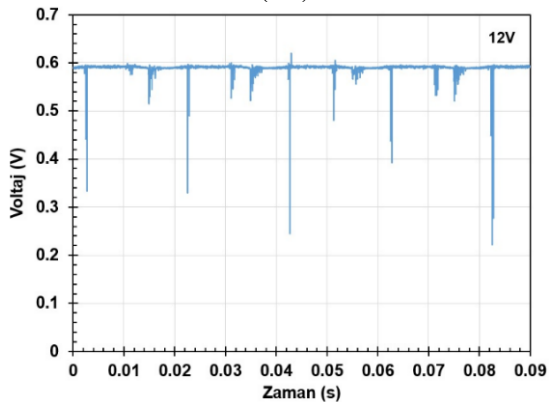
b-(6V)



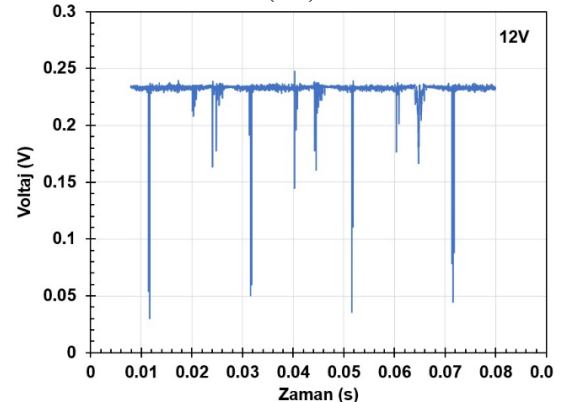
c-(9V)



c-(9V)



d-(12V)



d-(12V)

Şekil 14. TEG'den ölçülen voltaj değeri ısı emici olduğu durum.

Şekil 15. TEG'den ölçülen voltaj değeri ısı emici olmadığı durum.

4. SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmalarda tüm TEG yüzeyi kullanılarak araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, deneysel çalışmada iki farklı durum için (TEG+ ısı emici ve Sadece TEG) inceleme yapılmıştır. TEG+ ısı emici durum için, güç kaynağının voltajı (12V) olarak olduğu durumda elektrikli ısıtıcının sıcaklığı 119.5°C, soğuk taraf yüzey sıcaklığı 69.9°C ve sistemin voltajı yaklaşık olarak (0.6V) olduğu gösterilmiştir. Ancak, ısı emici olmadığı durum için, güç kaynağının voltajı (12V) olarak olduğu durumda elektrikli ısıtıcının sıcaklığı 119.5°C, soğuk taraf yüzey sıcaklığı 94.5°C ve sistemin voltajı yaklaşık olarak (0.23V) olduğu gösterilmiştir. TEG ve ısı emici olduğu durumda sistemin performansı arttığı gösterilmiştir.

TEG'in ısı performansını, bir dizi faktöre bağlıdır. Bunlar arasında kullanılan termoelektrik malzemenin özellikleri, sıcaklık gradyanı, soğutma sistemleri ve termal bağlantılar yer almaktadır. Termoelektrik malzemeler, termoelektrik etkiyi en iyi şekilde kullanabilmek için yüksek ısı iletkenlik ve düşük elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip olmalıdır. Bu, ısıyı hızla ileten ancak elektriği engelleyen malzemeleri ifade eder. Yüksek performanslı termoelektrik malzemelerin geliştirilmesi, termoelektrik jeneratörlerin verimliliğini artırabilir.

Bu çalışma, atık ısılardan elektrik enerjisinin üretilmesi, üretilen enerjinin optimizasyonu ve ısı ve elektriksel katkılarının olacağını göstermiştir. Böylelikle, atık ısı elektriğe çevrilirken en verimli sistem parametreleri belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MF-19009) tarafından finanse edilen bir projenin sonuçlarını sunmaktadır. Proje ekibi Aydın Adnan Menderes Üniversitesi'nin sağladığı desteğe teőekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. EIA. U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook, 2018.
2. Melcor, Thermoelectric Engineering Handbook, <http://www.melcor.com>, Ocak 28, 2023.

3. Hodes, M., "Precision Temperature Control using Thermoelectric Module", Heat Transfer Calculation McGraw Hill, New York, 2004.

4. Ho Sung L., "Thermoelectrics: Design and Materials", Wiley, UK, 2016.

5. Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B., "A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 65, Pages. 698-726, 2016.

6. Pourkiaei, S.M., Ahmadi, M.H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L., Yazdi, M.A.P., Kumar, R., "Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices a review of present and potential applications, modeling and materials", Energy, Vol. 186, Article 115849, 2019.

7. Hodes, M., "On One-Dimensional Analysis of Thermoelectric Modules (TEMs)", IEEE Trans. Components Packaging, Vol. 28, Issue 2, Pages 218-229, 2005.

8. Esarte, J., Min, G., Rowe, D.M., "Modelling heat exchangers for thermoelectric generators", Journal of Power Sources, Vol. 93, Issues 1-2, Pages 72-76, 2001.

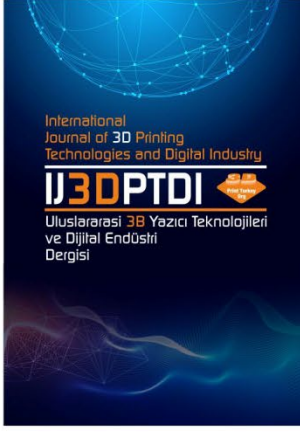
9. Astrain, D., Vian, J. G., Martínez, A., Rodríguez, A., "Study of the Influence of Heat Exchangers' Thermal Resistances on a Thermoelectric Generation System", Energy, Vol. 35, Issue 2, Pages 602-610, 2010.

10. Hsu, C.T., Huang, G.Y., Chu, H.S., Yu, B., Yao, D.J., "Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system by thermoelectric power generators", Applied Energy Vol. 88, Issue 4, Pages 1291-1297, 2011.

11. David, B., Ramousse, J., Luo., "Optimization of thermoelectric heat pumps by operating condition management and heat exchanger design", Energy Conversion and Management, Vol. 60, Pages 125-133, 2012.

12. Date, A., Date, A., Dixon, C., Akbarzadeh, A., "Progress of thermoelectric power generation systems: prospect for small to medium scale power generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 33, Pages 371-81, 2014.

13. Matsumoto, M., Mori, M., Haraguchi, T., Ohtani, M., Kubo, T., Matsumoto, K., Matsuda, H., "Development of state of the art compact and lightweight thermoelectric generator using vacuum space structure", SAE International Journal of Engines, Vol. 8, Issue 4, Pages 1815-1825, 2015.



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>

VASCULAR ARTERY SIMULATION MODEL FABRICATION FOR PRE-SURGERY KIT FOR STENT APPLICATION

Yazarlar (Authors): Tuğba UĞURTAŞ^{ID}, Hakan YILMAZER^{ID*}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Uğurtaş T., Yılmaz H., "Vascular Artery Simulation Model Fabrication For Pre-Surgery Kit For Stent Application" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 268-276, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1246758

Araştırma Makale/ Research Article

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

VASCULAR ARTERY SIMULATION MODEL FABRICATION FOR PRE-SURGERY KIT FOR STENT APPLICATION THROUGH 3D PRINTING

Tuğba UĞURTAŞ^a , Hakan YILMAZER^b ^{*}

^a Yıldız Technical University, Faculty of Graduate School of Science and Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, TURKEY

^b Yıldız Technical University, Faculty of Chemical and Metallurgical Engineering, Department of Metallurgical and Material Engineering, TURKEY

^{*} Sorumlu Yazar: hakanyil@yildiz.edu.tr

(Received: 02.02.23; Revised: 25.03.23; Accepted: 17.04.23)

ABSTRACT

Thrombosis occurs of a blood clot in the vein and blocking blood flow. The formation of a clot within the artery is called arterial thrombosis. Due to arterial thrombosis, there are heart attacks and strokes that result in more than 17.9 million deaths worldwide each year. Covid-19, one of today's problems, further increases the mortality rate. The thrombosis mechanism includes factors coming from the blood and the vessel wall. This mechanism is based on local blood flow mechanisms and 3-dimensional (3D) vessel geometry. Microfluidics chip-based vascular models examine the interaction between blood and the vessel wall in vitro studies in thrombosis. Until now, the 3-dimensional geometry of the arteries and blood flow system of healthy or unhealthy individuals have not been fully modeled. In this study, a patient-specific occluded blood vessel model was obtained from computed tomography angiography (CTA) data, and miniature vascular structures were developed with a 3D printer. These structures were printed using Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). 3D ABS samples were used in Polydimethylsiloxane (PDMS) based soft lithography molds to occur microfluidic systems containing miniaturized replicas of in vivo vessel geometries. A comprehensive simulation of stented vasculature was performed by flow analysis of artificial blood and cell culture by placing a commercial stent on PDMS-based models. This project has aimed to develop and characterize modules by creating microfluidic systems using 3D printers to examine the effects of stents placed in the patient's complex vascular system and to simulate operations before treatment and stent placement.

Keywords: Patient-specific modelling, 3D printing, Microfluidics, Stent.

1. INTRODUCTION

The first reason of heart attacks and strokes is arterial thrombosis, causing more than 17.9 million deaths worldwide each year [1]. According to the American Heart Association, the number is expected to grow to more than 23.6 million by 2030. Due to increasing death, physicians constantly need to learn new skills in clinical treatment, for example; 3D printing helps in the struggle to keep up with an all-changing clinical environment [2]. Thrombosis is a complex process initiated by several genetic and acquired factors. For example, blood-borne factors, dynamic fluid effects, and vascular wall dysfunction. Although, animal models are the most appropriate experimental tool to study the

pathophysiology of thrombosis in laboratory applications, even though these models mimic the mechanical multifactorial complexity found in arterial thrombosis but cannot completely explain human disease or human physiology. For instance, rodent platelet biology and clotting dynamics vary between species. Mouse thrombocyte differs from human platelets in size, number, and structure, but they are very similar functionally [3-4]. For this reason, in vitro blood flow chambers were perfused with blood, in vivo models were created and used [5]. In recent years, it has been observed that organs can be produced in chips designed in vitro. Thus, the samples were produced that show the characteristics of human physiology with

unprecedented realism [6]. Furthermore, it has enabled the production of 3D structures that realistically mimic the natural shape of human tissue with its complex structure and can be useful in replicating the structure of human blood vessels [7-8]. Microfluidic vascular systems have been modeled and fabricated to analyze blood flow and reveal defects and problems before the required applications and treatments for cardiovascular diseases [9-10]. Many years ago, surgeons had to depend on their anatomical knowledge of the human body and other things as they progressed through the operation. Computer technology is easier than the other approaches. Medical imaging technologies provide the data on 3D structure and function at the cellular, tissue, organ and organism levels. Computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing tools are providing collection and digitization with the complex architectural information for tissues and organs. It can also be modified or designed, with the benefits of the usage of computer-aided design tools, on demand. The idea of 3D printing surgical models is improved so soft tissues are 3D printed in parts or whole and provided to the surgeons [11-12].

Computerized tomography angiography scans were acquired from Digital imaging and communication in medicine (DICOM). These DICOM files, consisting of two-dimensional texture image segments, can be combined to produce 3D samples. These files were read and segmented with 3D-Slicer. All slices are converted to a 3D sample using the “model making” option in 3D-Slicer [13]. Especially, Fused Deposition Modeling (FDM) 3D could be the convenient technique to fabricate architecturally complex vessel design, also it has high printing resolutions for manufacturing microfluidic chips [14-15]. There were much current imaging and diagnostic technologies, such as magnetic resonance imaging (MRI) and computer tomography (CT), have been explored to acquire information about the targeting tissues and achieve the CAD data of the grafts. The CT imaging is based on the variable absorption of X-rays by different tissues. MRI also can provide high spatial resolution in soft tissue via using nuclear magnetic resonance. The contrast of biological structures can be strongly increased with the use of contrast agents. The area where 3D printing was most commonly used in cardiovascular.

Bioprinting technologies and 3D printers help the pre-treatment of heart diseases. For example; modeling vessels for providing pre-operative studies, the development of organ models, and producing artificial organs. [16].

In this study, the complex vascular structure specific to the patient was modeled with the patient's computerized tomography data produced by using 3D printers and microfluidic systems. Afterward, a commercial stent was placed in this model, and a comprehensive simulation of the stent patient vascular structure was performed with artificial blood and cell culture flow analysis. The aim of this project is the development and characterization of modules using 3D printers and microfluidic systems in order to examine the effects of stents being placed in the patient's complex vascular system and to perform pre-trial operations before treatments. First, (Computed Tomography) CT or (Magnetic Resonance Imaging) MRI data of the patient's occluded vessel (.dicom) was obtained. This data then proceeds from the (.dicom) extension to the modeling stage with the 3D Slicer. In the modeling stage, the sample's design was done using Solidworks. After the desired values were set, the sample was printed with an FDM-type 3D printer using ABS filament. The printed sample was placed in the prepared PDMS mixture [13-17]. The resulting product, after cooling at room temperature, was placed in a seventy-degree oven for four hours and placed in acetone. Necessary tests were performed on the emptied PDMS sample. Finally, the effect of the vessel geometries on platelet aggregation was evaluated by perfusing the vessel models at true arterial shear rates.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. Modelling of the Artery from CT Scan Data

Powder, liquid, or solids are widely used in 3D printing. These materials produce objects through layers. Starting from the bottom and each new layer accumulating was printed to adhere to the previous layer, this creates a gradual structure. The structure of the 3D printed sample was created by the Computer aided design (CAD) model loaded into the 3D printer (Figure 1). CAD models define 3D objects in a series of cross-section layers and allow 3D printers to physically reproduce the models in an additional process. CT scanning

was converted into a model using phantom [13-18]. In order for 3D printers to control, G-code encoding CAD models was used. Print speed, print head temperature, layer height, and pressure can be changed and optimized with the G code.

The sample has five steps in the phantom design process:

- 1.) Take CT from the patient,
 - 2.) Make a simple model and smooth vasculature,
 - 3.) Make design support for the vasculature,
 - 4.) Support design model
- 3D printing the phantom (Figure 1).

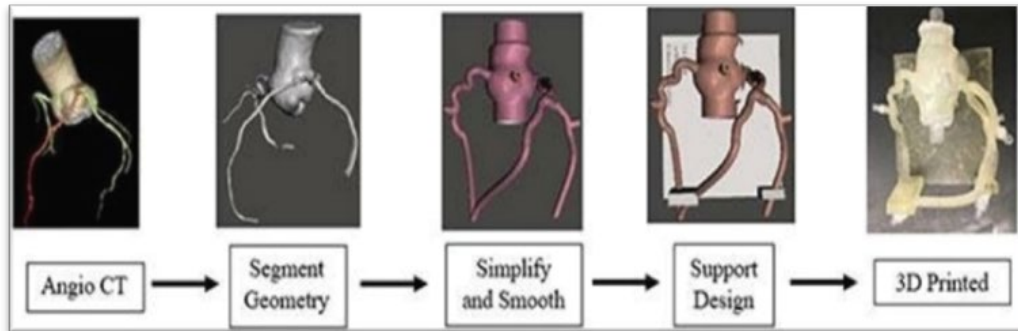


Figure 1. Reference negative sample [19].

ABS is a thermoplastic polymer. The filament has a diameter of 1.75 mm. It was used to print out the artery model by FDM 3D printer. ABS has a low melting point. Due to its use in injection molding and 3D printing easily, it is suitable for modeling negative samples [20]. The ABS was melted just above the glass transition temperature, and then a layer of layer was printed on the side or top of the extrusions to form the object layer. The filament was taken into the nozzle and squeezed at the hot and

melted. Then deposited on the layers of the print bed. These layers were combined to accumulate during printing and form a finished negative sample. One of the biggest benefits of FDM 3D printing is its scalability. It can easily scale to any size, and this helps decrease the cost/size ratio. FDM printers are preferred because of their low part costs and simple design. Another advantage is the flexibility of the material. FDM printers can print a wide variety of thermoplastic materials [21-22].

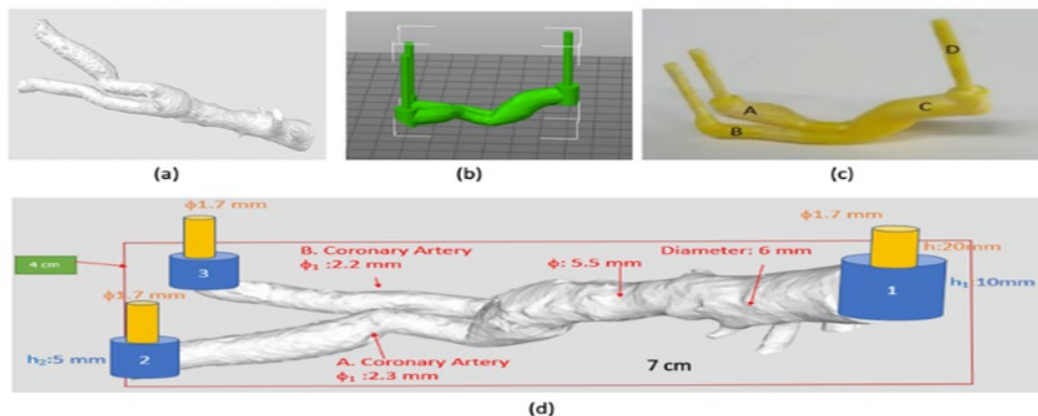


Figure 2. (a) The 3D sample of the artery from the DICOM data of CT scanning, (b) CAD modeling with additional channels for the inlet and outlet of the fluids of the macro fluidic system, (c) The fabricated negative sample, (d) Dimensions of the sample.

The disadvantage of FDM 3D printing is difficult to obtain highly detailed prints and part quality. The material must extrude in layers and must have a predetermined thickness. Another disadvantage of FDM is that each layer is

unified. They create weak points in printing and make these prints unsuitable for certain applications [23]. The material formed after printing (Figure 2) and the dimensions of the negative sample (Table 1).

Table 1. Dimension of sample for Figure 2.

Thickness of main vessel [C]	0.475 cm
Diameter of feet [D]	0.9 cm
Thickness of lateral vessel – 1 [A]	0.4 cm
Thickness of lateral vessel – 2 [B]	0.25 cm
Length of feet [D]	1.3 cm
Length of body	3.5 cm
Width of main vessel [C]	0.52 cm
Width of lateral vessel – 1 [A]	0.475 cm
Width of lateral vessel – 2 [B]	0.27 cm

2.2. Fabrication of Negative Artery Model by FDM 3D Printer

The sample was formed from the computed tomography data. The sample was printed with the dimensions and thicknesses by 3D printing. The printing parameters in the FDM 3D printer (Table 2).

Table 2. FDM printing parameters for the artery sample fabrication.

Nozzle temperature(°C)	255
Bed temperature(°C)	100
Process time (min)	25
Sample of printing	Prusa i3s
Slice of program	Prusa slicer
Size of sample (%)	60
Layer of thickness (mm)	0.3
First layer thickness (mm)	0.35
Ambient temperature (°C)	Room temperature

2.3. Surface Treatment of the Printed Samples

In order to obtain transparent PDMS channels of the artery model, the surface of the negative sample has to be a mirror-like smooth surface. The rough printed surface (Figure 3a) was ground to obtain a smooth surface. The grinding paper was 2500. The ground ABS negative sample was held in the acetone vapor to obtain a polished mirror-like surface of the artery model. This process took approximately 15-20 minutes, keeping the temperature between 40-45 degrees (Figure 3b-c). It was left to cool at room temperature for 1-2 hours (Figure 3d).

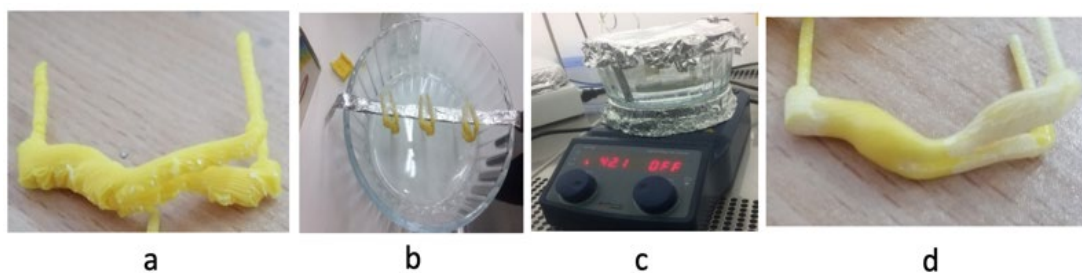


Figure 3. (a)Printed negative sample having rough surface, (b-c) printed negative samples subjected to the acetone vapor bath at 40C for 15-20, (d) polished sample.

Acetone vapor was maintained since the sample's feet were thin. This may result in issues like rupture. As an alternative way, the vaporization time of the sample was shortened, and the sample was immersed in acetone directly at room temperature with the aid of tweezers in acetone for 2-3 seconds. The surfaces of the first printed sample and the

sample immersed in acetone are quite different. The surface of the sample immersed or waited in acetone vapor was almost smooth.

2.4. Fabrication of the Flexible Artery Samples

PDMS was used to fabricate the artery sample because of its high flexibility, visibility, and

transparency. Also, PDMS has a large molar volume, a low cohesive energy density, is very resistant to ozone and corrosion, stable to atomic oxygen and even oxygen plasma. Other advantages are that the ability to form films, high permeability to various gases, hydrophobic nature, ability to move freely, surface activity, and inertness against chemical and physical effects [24].

The PDMS and the current agent have been mixed at a rate of 10:1 for 5-6 minutes [14]. The mixing process was carried out to ensure that the PDMS and the binding agent were homogeneously combined. After the mixture was prepared, too many air bubbles were observed in it. After the mixture was prepared, a lot of air bubbles were observed in it. A vacuum desiccator was used for approximately 45-60 minutes to remove these air bubbles. The negative sample is made of ABS placed in molds. As can be seen from Figure 4a, the sample did not touch the left, right and bottom of the container (Figure 4a). After the prepared PDMS was poured on it, it places in the vacuum desiccator to get rid of the air bubbles that formed inside it. It was held for 30-45 minutes.

The sample was placed in the oven where the temperature increased to 70 degrees. After 4 hours in the oven, the curing of the PDMS was completed and allowed to cool to room temperature. After the sample reached sufficient temperature, it was removed from the container (Figure. 4b).

The negative vessel sample occurs of the ABS polymer. The sample material is PDMS so, the negative sample inside needs to empty, i.e. to melt the ABS polymer. The ABS polymer had been waited in acetone for three days (Figure 4c), so the ABS polymer was softened. To speed up the dissolving of the ABS polymer completely, acetone send to a vein by syringe. After the ABS dissolved 70-80 percent, the sample had been placed into new acetone. The sample should not hold in the same acetone for a long time. Acetone was changed day by day. When the ABS dissolved in the acetone, the liquid turned yellow. After the ABS dissolved completely, the sample held in the new acetone for one day in order to obtained a quite clean and transparent model (Figure 4d).

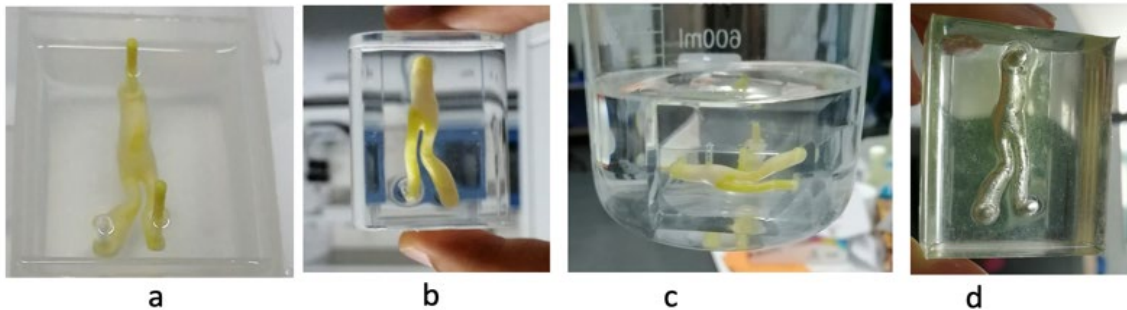


Figure 4. (a) The negative sample was replaced in the PDMS mixture, (b) the sample was cured in the oven (c) The sample was thrown into acetone to dissolve ABS, (d) The ABS solve in the negative sample.

2.5. Stent Placement in Sample

The balloon stents should be pushed into the desired hole (Figure 5a), air was given to the balloon in the stent to inflate, thus opening the stent (Figure 5b). The process of giving air is called the positive direction. Next, the air must be drawn in the negative direction. After the wire and balloon were removed from the stent, they must be removed from the sample. In this way, stent placement is completed.

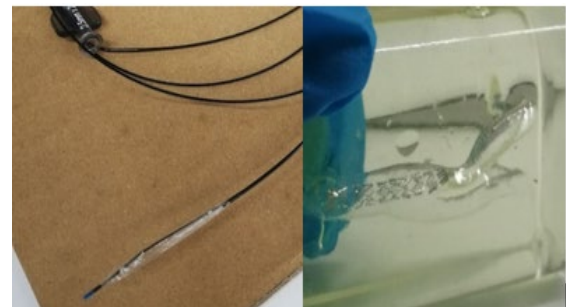


Figure 5. a) After the stent was placed and the balloon was inflated and b) the stent was placed in the sample.

After the stent was placed in the samples, they were cleaned with ethanol or pure water. Ethanol was used as an antibacterial due to its antiseptic properties. Then apply 254 nm UV. UV rays with a wavelength of 254 nm neutralize any microorganism in water without creating any harmful by-products, odors, or tastes and without disturbing the natural properties of water. So, it was used as a disinfectant. After the

blood was prepared, a suitable device was set up to pass through the sample. The sample was placed in the apparatus (Figure 6). Followed by nitrogen gas and the oxygen in the sample was swept. The temperature of the blood was set to 37 degrees. The peristaltic pump was set and operated at the desired value.

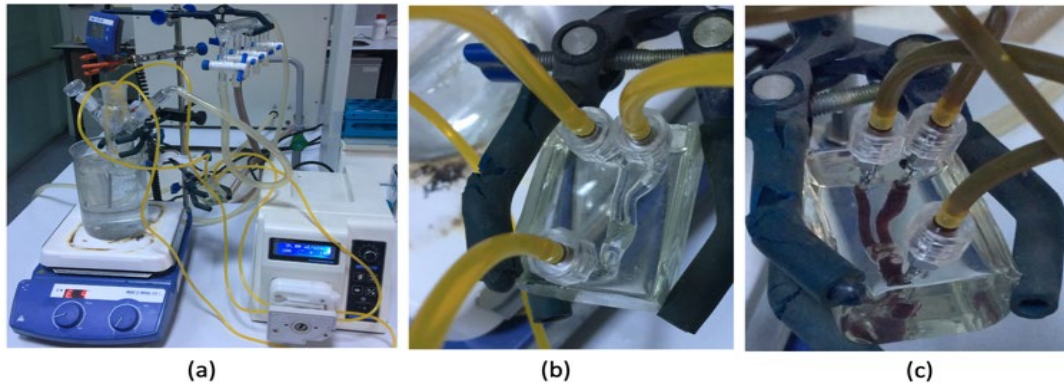


Figure 6. (a) Blood circulation setup, (b) the artery sample having stent without blood, and (c) the artery sample having stent without blood design of the dynamic test bench and close-up view of the sample

Nitrogen gas was introduced inside the blood reservoir before the blood circulated through the sample due to prevent blood clotting. Prepared blood circulated from the reservoir to the artery sample using a peristaltic pump with a flow rate of 35 ml/min through the stented sample. After the blood circulation, the stent-placed channel of the artery sample was cut to examine using a stereo microscope. Thus, the sample was enlarged and ready for observation. After the blood passed through the prepared sample, it was examined under a stereo microscope. The sample was examined from the outside without cutting. The stent placed in the examination is evident. Furthermore, a layer was formed on top of the stent. The inside of the sample was divided into two parts for examination (Figure 7). The accumulation of stent and vessel parts was investigated. In some areas of the stent, blood deposition was observed.

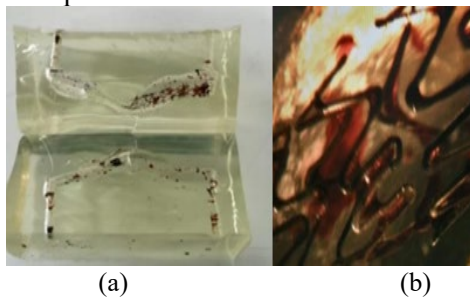


Figure 7. (a) Stent view within the sample, (b) The sample was divided into two

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Surface Treatment of the Printed Samples

In order to obtain transparent PDMS channels of the artery sample, the FDM 3D printed negative sample the surface which has to be smooth. That's why acetone vapor have been applied to the samples but the feet of the samples were thin so which caused the problems such as rupture. As an alternative way, they was shortened vapor time, and the sample was immersed in acetone directly at room temperature with the aid of tweezers in acetone for 2-3 seconds. The surfaces of the first printed sample and the sample immersed in acetone have quite different. The surface of the sample immersed or waited in acetone vapor has almost smooth. ABS sample printed with 3D has an extremely rough surface. That's why the sample needs to be grinded and held to acetone vapor or dipping it into acetone at room temperature is necessary. If enough surface roughness is not removed, air bubbles can be formed around the vessel sample when the sample was thrown into the oven (Figure 8a). Therefore, the first thing is that the surface of the sample was ensured to be smooth and then other steps were started. If the necessary steps were taken, the desired sample can be obtained (Figure 8b).

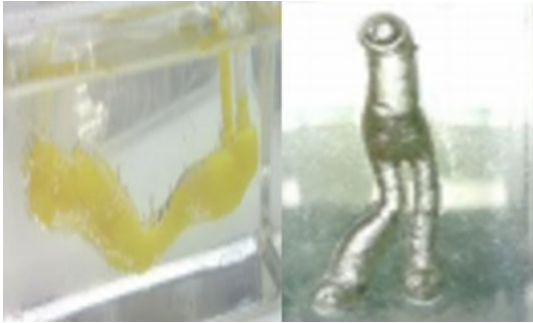


Figure 8. (a) uncomplete removing of the surface roughness and air bubbles (b) sufficient surface smoothness

The prepared PDMS mixture has a lot of air while mixing and if these bubbles would not remove, the PDMS could fill with bubbles around the sample when it was thrown into the oven. With the help of a desiccator, the air bubbles must be removed very well. PDMS was left in the desiccator for 30-45 minutes and then thrown into the heated oven. PDMS mixture was made in a clean container. It was covered when it was removed from the desiccator because PDMS absorbs the dust in the environment very easily. When the temperature of the sample coming out of the furnace reaches room temperature, it was removed from the molds and discarded into pure acetone. However, if the sample always remains in the same acetone, it takes the color of the dissolved ABS. The acetone of the two upper samples was changed once and the acetone of the side-by-side samples was changed twice (Figure 9).



Figure 9. The color depending on the frequency of changing acetone

Therefore, it should change acetone every day for four days and the samples looked much more transparent and non-yellowing than other samples. The acetone of the samples was changed daily and the sample with the desired properties was obtained. There were some difficulties in placing the stent. For example, the balloon may be damaged when inserting an unopened stent, or there may be problems with the stent coming back with the balloon when inflating the balloon and withdrawing the balloon after inserting the stent. In this study, the stent was collected in the mouth while the inflatable balloon was removed. When the stent remains in the body for a long time, it was covered with a layer over time due to the accumulation of blood tissue. The formation of this layer prevents the stent from performing its function and leads to the re-occlusion of the vessel. Therefore, the stent does not constitute a permanent solution for a long time.

4. CONCLUSIONS

In this study, a new approach was studied to develop patient-specific microfluidic blood vessel model. Following conclusions were obtained;

1. To remove surface roughness; After grinding, it was kept in acetone vapor at 40-45 degrees for 15-20 minutes, or negative samples can be dipped into acetone at room temperature for 2-3 seconds with the help of tweezers. This time can also be increased according to the surface roughness of the sample. In order for the samples not to turn yellow; Acetone was changed daily.
2. For stent placement; Feet was in the same direction as the veins.
3. To acquire images when connected to a peristaltic pump; The depth of the negative sample was less, and the gap was closer to the surface. Dynamically degradable testing was performed before animal blood was drawn to develop biodegradable stents. Pre-made samples can detect diseases or other conditions and can be used to help heal, treat, or prevent disease. Permanent implantation of the stent can alter the hemodynamics of blood flow and again cause vascular occlusion.

5. FUTURE RECOMMENDATIONS

Considering all the studies carried out, the vessel sample was designed in the most appropriate way and the vessel sample was obtained. For the homogeneous passage of blood; All veins should be the same height. The drawing of new sample was drawn with Solidworks (Figure 10).

Computational Fluid Dynamics is widely used to analyze the hemodynamic behavior and wall shear stress distribution in-stent arteries. It makes sense to simulate a steady blood flow, which can be useful in more complex simulations and significantly reduces computation time. These findings provide good insight into future stent placement designs to reduce re-occlusion [25].

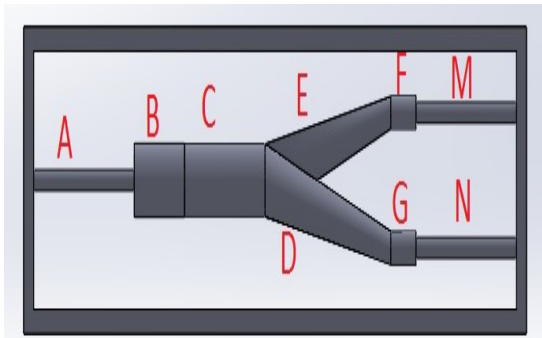


Figure 10. A illustration of new patient-specific microfluidic blood vessel model.

The dimensions of the negative sample for printing a new sample (Table 3). It is important to choose the right frame for adequate use of PDMS and position the sample in the right place. The dimensions of the frame for choosing (Table 4).

Table 3. Dimensions of the negative sample.

Parts of sample	Length (mm)	Diameter (mm)
A	20	1.7
B	10	6
C	20	5.9
D	25	2.6
E	25	2.6
F	5	2.7
G	5	2.7
M	20	1.7
N	20	1.7

Table 4. Dimensions of the frame.

Length	100 mm
Thickness	2 mm
Height	6 mm
Width	25 mm

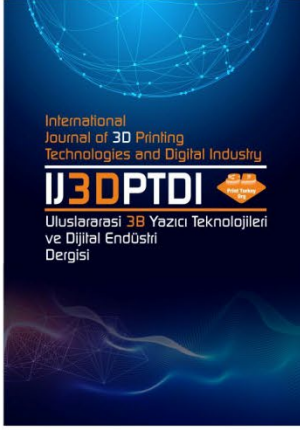
ACKNOWLEDGE

The author would like to thank Muhammed Esad ÇAKIR helped to design the model and Gürhan KONCAOĞLU, KALEM Engineering Company, for printing the models using a the 3D printer. The authors would also like to Prof. Dr. Siyami Karahan in the Veterinary Faculty of Kırıkkale University for the flow analysis.

REFERENCES

- World Health Organization. “Cardiovascular Diseases (CVDs)”, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-cvds>, June 11, 2021.
- Torres, I. and Luccia, N. de, “Artificial vascular models for endovascular training (3D printing)”, *Innovative Surgical Sciences*, Vol. 3, Issue 3, Pages 225–234, 2018.
- Jirouskova, M., Shet, A.S., & Johnson, G.J., “A guide to murine platelet structure, function, assays, and genetic alterations”, *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, Vol. 5, Issue 4, Pages 661-669, 2007.
- Suo, J., Ferrara, D.E., Sorescu, D., Guldberg, R.E., Taylor, W.R., and Giddens, D.P. “Hemodynamic shear stresses in mouse aortas: implications for atherogenesis”, *Arteriosclerosis, Thrombosis, And Vascular Biology*, Vol. 27, Issue 2, Pages 346-351, 2007.
- Van Kruchten, R., Cosemans, J.M., and Heemskerk, J.W., “Measurement of whole blood thrombus formation using parallel-plate flow chambers—a practical guide”, *Platelets*, Vol. 23, Issue 3, Pages 229-242, 2012.
- Van der Meer, A.D., Orlova, V.V., ten Dijke, P., van den Berg, A., and Mummery, C.L., “Three-dimensional co-cultures of human endothelial cells and embryonic stem cell-derived pericytes inside a microfluidic device”, *Lab on a Chip*, Vol. 13, Issue 18, Pages 3562-3568, 2013.
- Malda, J., Visser, J., Melchels, F.P., Jüngst, T., Hennink, W.E., Dhert, W.J.A, Groll, J., and Huttmacher, D.W., “25th Anniversary Article: Engineering Hydrogels for Biofabrication”, *Advanced Materials*, Vol. 25, Issue 36, Pages 5011-5028, 2013.

8. Visser, J., Peters, B., Burger, T.J., Boomstra, J., Dhert, W.J., Melchels, F.P., & Malda, J., "Biofabrication of multi-material anatomically shaped tissue constructs", *Biofabrication*, Vol. 5, Issue 035007, Pages 1-9, 2013.
9. Tsai, M., Kita, A., Leach, J., Rounsevell, R., Huang, J.N., Moake, J., Ware R.E, Fletcher, D.A. and Lam, W.A., "In vitro modeling of the microvascular occlusion and thrombosis that occur in hematologic diseases using microfluidic technology", *Journal of Clinical Investigation*, Vol. 122, Issue 1, Pages 408-418, 2011.
10. Zheng, Y., Chen, J., Craven, M., Choi, N.W., Totorica, S., Diaz-Santana, A., Kermani P., Hempstead, B., Fischbach-Teschl, C., Lopez, J.A., and A.D., Stroock, "In vitro microvessels for the study of angiogenesis and thrombosis", *Proceedings of The National Academy of Sciences*, Vol.109, Issue 24, Pages 9342-9347, 2012.
11. Stevenson, K., The full spectrum of 3d printed surgical models, www.fabbaloo.com, March 3, 2021.
12. Sahin M.E., "Example of Using 3D Printers in Hospital Biomedical Units" *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol.6, Issue 2, 322-328, 2022.
13. Costa, P.F., Albers, H.J., Linssen, J.E., Middelkamp, H.H., van der Hout, L., Passier, R., van der Berg, A, Malda, J. and van der Meer, A.D. "Mimicking arterial thrombosis in a 3D-printed microfluidic in vitro vascular model based on computed tomography angiography data", *Lab on a Chip*, Vol.17, Issue 16, Pages 2785-2792, 2017.
14. Knowlton, S., Yu, C. H., Ersoy, F., Emadi, S., Khademhosseini, A., and Tasoglu, S. "3D-printed microfluidic chips with patterned, cell-laden hydrogel constructs", *Biofabrication*, Vol. 8, Issue 2, Pages 025019, 2016.
15. Zorlutuna, P., Annabi, N., Camci-Unal, G., Nikkhah, M., Cha, J.M., Nichol, J.W., Manbachi, A., Bae, H., Chen, S., Khademhosseini, A., "Microfabricated biomaterials for engineering 3D tissues", *Advanced Materials*, Vol. 24, Issue 14, Pages 1782-1804, 2012.
16. Jin, Z., Li, Y., Yu, K., Liu, L., Fu, J., Yao, X., Zhang, A., and He, Y., "3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges", *Advanced Science*, Vol. 8, Issue 17, Pages e2101394, 2021.
17. Hacıoğlu A., Yilmazer H. Ve Ustundag C. B., "3D printing for tissue engineering applications", *Politeknik Dergisi*, Vol. 21, Issue 1, Pages 221-227, 2018.
18. Vangunten, M. T., Walker, U. J., Do, H. G., & Knust, K. N., "3D-printed microfluidics for hands-on undergraduate laboratory experiments. *Journal of Chemical Education*", Vol. 97, Issue 1, Pages 178-183, 2019.
19. Sun, Z., "Clinical Applications of Patient-Specific 3D Printed Models in Cardiovascular Disease: Current Status and Future Directions", *Biomolecules*, Vol.10, Issue 1577, Pages 1-34, 2020.
20. Peters, E.N., "Plastics, Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers, *Handbook of Materials Selection*", Pages 363-365, John Wiley & Sons, New York, 2015.
21. Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S.H. and Wright, P.K., "Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments", *Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference*, Cincinnati, USA, 2001.
22. Wu, J., Hamada, M., "Experiments, Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization", John Wiley & Sons, Inc., 2000.
23. Khawaja, H. al, Alabdouli, H., Alqaydi, H., Mansour, A., Ahmed, W. and Jassmi, H. al, "Investigating the Mechanical Properties of 3D Printed Components", *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, Pages 1-7, 2020.
24. Çavuşoğlu, Y. "Synthesis and characterization of cross-linked poly (dimethyl siloxane) nanocomposites", Master's thesis (Publication No.10007838), Istanbul Technical University, Istanbul, 2013.
25. Hsiao, H. M., Lee, K. H., Liao, Y. C., & Cheng, Y. C. "Hemodynamic simulation of intra-stent blood flow", *Procedia Engineering*, Vol. 36, Pages 128-136, 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>

MALICIOUS UAVs CLASSIFICATION USING VARIOUS CNN ARCHITECTURES FEATURES AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Yazarlar (Authors): Ahmet Feyzioğlu^{ID*}, Yavuz Selim Taşpınar^{ID}



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Feyzioğlu A., Taşpınar Y.S., "Malicious UAVs Classification Using Various CNN Architectures Features and Machine Learning Algorithms" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 277-285, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1268605

Araştırma Makale/ Research Article

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

MALICIOUS UAVs CLASSIFICATION USING VARIOUS CNN ARCHITECTURES FEATURES AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Ahmet Feyzioglu^a, Yavuz Selim Taşpınar^b

^aMarmara University, Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, TÜRKİYE

^bSelcuk University, Doganhisar Vocational School, Transport and Traffic Services, TÜRKİYE

* Corresponding Author: ahmet.feyzioglu@marmara.edu.tr

(Received: 21.03.23; Revised: 03.04.23; Accepted: 11.04.23)

ABSTRACT

Aircraft are used in many fields such as engineering, logistics, transportation and disaster management. With the development of drones, aerial vehicles have become more widely used for entertainment purposes. However, in addition to its useful applications, its malicious use is also becoming widespread. It has become a necessity to eliminate this problem, especially since it poses a significant danger to other aircraft. In order to identify the aircraft and solve this problem quickly, in this study, five different aircraft were classified based on images. In the study, a five-class dataset containing aeroplane, bird, drone, helicopter and malicious UAV (Unnamed Aerial Vehicle) images was used. Three different CNN (Convolutional Neural Network) models were employed to extract the images of features. Image features extracted with SqueezeNet, VGG16, VGG19 models were classified with Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM) and Logistic Regression (LR) machine learning methods. As a result of the experiments, the most accuracyful result, 92%, was obtained from the classification of the features extracted with the SqueezeNet model with ANN. The models proposed in the study will be integrated into various systems and used in the field of aviation to detect malicious UAVs and take necessary precautions.

Keywords: Drone, UAV, Aeroplane, CNN, Machine Learning.

1. INTRODUCTION

Different types of drones are used for many different purposes and have become frequently used in the surveillance, security and defense industries. However, drones can be used for malicious purposes as well as in other areas. Its use is also increasing in order to harm people, nature and other aircraft [1]. For these reasons, a decision should be made about whether drones are detected in advance and whether they are harmful [2]. In order to detect drones, image processing methods [3], sensors [4] and acoustic sounds are used [5]. However, the use of these systems can be quite costly. In addition, its use on another drone may create a disadvantage in terms of weight and cost [6]. Each drone detection method has advantages and disadvantages [7]. Drone detection through images is one of the cheapest and fastest methods [8].

In recent years, drone detection and classification applications have gained more importance with the increasing use of drones. Drone detection can be done with object detection methods [9]. In these studies, there is only one type of class and detection models are trained by tagging the drone object on the images [10]. With the Object recognition methods, it is possible to detect and identify different objects on the same image [11]. In Object classification methods, the images can be classified as a whole and the objects in the image can be classified. In the classification method, there is no need to label the object on the image. For this reason, this method is often preferred in artificial intelligence applications [12].

Mendis et al. They proposed a radar system for unmanned aerial systems using Doppler signatures and spectral correlation functions.

They used deep belief networks to classify the data. With their proposed method, they classified the unmanned aerial vehicles with an accuracy of over 90% [13]. Kim et al. suggested using the Doppler signature as the basis for CNN classification. They achieved a maximum classification accuracy of 100% in the classifications they made with the dataset they used [12]. Rozantsev et al. They propose an approach to classify aircraft that are still moving with a moving camera. They used both image and motion features to solve this challenging problem. They suggested that they achieved higher classification accuracy with spatio-temporal image cubes than with the latest techniques. They created the dataset they used and it is not open to the public [14]. Yoshihashi et al. They made classifications with their proposed recurrent correlational network using datasets containing bird and unmanned aerial vehicle images. In their experiments, they suggested that the method they proposed outperformed other object classification models [15]. On the other hand, Aker et al. They proposed a convolutional neural network based object detection model. They proposed a comprehensive dataset generation algorithm using images removed from the background so that the model can be trained using little data. They obtained high precision and recall values with the model they proposed [9]. According to Saqib et al. They have made drone classification using CNN architectures such as VGG16. In their experimental results, they said that the VGG16 architecture with R-CNN showed higher performance than other architectures [16]. Lee et al. In their studies, they performed drone detection through images. The model they recommend is designed to work on camera drones. They performed drone detection with 89% accuracy using the OpenCV library [17].

When the studies in the literature are examined, different feature extraction CNN models and classification processes with these features are not done in detail. Considering the studies in the literature, the classification of malicious drones was carried out in this study. The processes performed in this study and the contributions of the study are as follows:

- A 5-class image dataset is used to objectively evaluate the classification performance of Malicious drones.

- The dataset contains images of birds, aeroplanes, drones, helicopters and malicious drones.
- Extraction of the features of the images was performed with 3 different CNN models. These models are SqueezeNet, VGG16 and VGG19.
- Three different machine learning models were used to classify the images obtained from CNN models. These models are ANN, SVM and LR.
- With the proposed models, 9 different classification results were obtained.
- Confusion matrix and different performance metrics were utilized to analyze the performance of the models.

The rest of the study is organized as follows: In the 2nd section, general information about the dataset, methods and performance metrics used in the study is given. In the 3rd section, the experimental results are given. In section 4th section, the results and recommendations obtained from the study are given.

2. MATERIAL AND METHODS

In this section, general information about the dataset used, CNN models used for feature extraction, machine learning models, confusion matrix and performance metrics are given. The flow chart showing the planning of the study is shown in Figure 1.

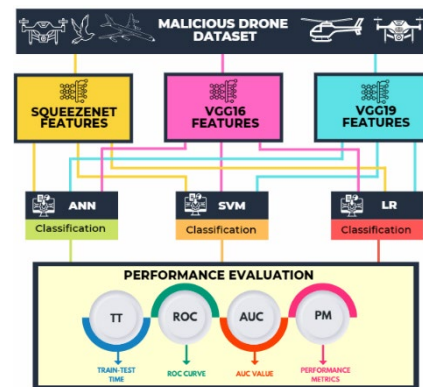


Figure 1. Flow chart of the study.

2.1. Malicious Drone Dataset

In the dataset used in the study, there are a total of 776 images in 5 classes. Includes footage of Malicious UAVs, drones, helicopters, aeroplanes and birds. The dataset was obtained from kaggle.com [18]. Each image contains a single object according to its class. This makes the dataset usable in classification problems. The sample images of the dataset and the number of data by classes are shown in Figure 2.

MALICIOUS DRONE DATASET



Figure 2. Malicious drone dataset example images for all class.

2.2. Convolutional Neural Networks (CNN)

CNN can offer an end-to-end solution with many layers of computation. It is a structure that includes convolution, pooling, activation and fully connected layers. Thanks to the convolution layers, feature maps of the images are obtained [19]. Parameter redundancy is eliminated by reducing the size of feature maps with pooling layers. With the activation layers, the data is drawn to the specified intervals. In the fully connected layer, the classification of the obtained feature maps is carried out [20]. A kind of artificial neural network, this layer. Images can be given to CNN models in raw form. In this way, there is no need for an extra feature extraction process [21]. CNN models were used for feature extraction from images in this study. Image properties can be retrieved just before the fully connected layer, which is the last layer in CNN models. Imported features can be classified by different machine learning models. Brief descriptions of the CNN architectures used in the study are given.

SqueezeNet: Iandola et al. Despite its small size, this architecture can achieve high classification accuracy. Model depth is 18. It contains 1.24M parameters in total. The size of the pre-trained SqueezeNet model is 5.2MB. Model size and number of parameters is the biggest advantage of this model [22-23].

VGG16: Developed by Simonyan and Zisserman, this model has a depth of 16. It contains 138M parameters in total. The size of the pre-trained VGG16 model is 515MB [24].

VGG19: As a difference from the VGG16 architecture, a 19-layer architecture was obtained by adding 3 more layers. The depth of this model is 19. The size of the pre-trained VGG19 model is 535MB. It contains 144M parameters in total [25].

The feature extraction capabilities of the three CNN models used in the study were utilized. The SqueezeNet model extracts 1000 features from each image [26]. The VGG16 and VGG19 models extract 4096 features from each image. Obtained images are given as input to machine learning models.

2.3. Machine Learning Methods

Machine learning algorithms are structures that can make predictions by learning patterns through training data. Labeled data given as input to supervised machine learning algorithms can be learned by the algorithm and can predict new data. More accurate and faster results can be obtained by selecting machine learning algorithms according to the problem to be solved. Supervised machine learning algorithms do not have features such as extracting features from images. For this reason, it is necessary to extract the features of the images beforehand and give them as input to these algorithms. The number of input parameters of machine learning algorithms is equal to the number of features obtained from images. The number of outputs is equal to the number of classes in the dataset. The explanations of the machine learning algorithms used in the study are as follows:

ANN: a type of machine learning that mimics biological neurons. It works similarly to the

human brain to solve problems. Classification processes are performed by establishing a connection between inputs and outputs in artificial neural networks. It contains 3 layers to perform these operations. These layers are the input layer, hidden layer and output layer. Each layer contains neurons. The connections between neurons in the input, hidden and output layers are called weights and learning is carried out through these weights. It is often preferred because of its computation time and high accuracy advantages. It is a non-linear type of machine learning [27].

SVM: SVM, which is a supervised learning algorithm, includes statistical learning operations. SVM has high generalization ability compared to other machine learning methods. Nonlinear learning is a type of machine learning. It performs the classification process by specifying a plane. It is also used in the classification of multi-class datasets. For these purposes, classification processes are carried out by determining more than one hyperplane [28].

LR: It is a machine learning method often used in classification problems. In this method, it is realized by establishing a connection between output variables (dependent variable) and input values (independent variable). It is a statistical machine learning method. This method is preferred because of its speed and high accuracy advantages [20]. The hyperparameters of the machine learning algorithms used in the study are given in Table 1.

Table 1. Training parameters of machine learning methods.

ANN	SVM	LR
Hidden layer neurons: 100	Kernel: RBF	Regularization type: Ridge (L2) Strength C = 1
Activation: ReLu	Numerical tolerance: 0.001	
Solver: Adam	Iteration: 100	
Regularization: 0.0001		
Iteration: 200		

2.4. Confusion Matrix and Performance Metrics

Confusion matrix is a table created for performance evaluation of a classification model. The columns of the matrix show the predicted value, while the rows show the actual values. True Positive (TP), True Negative (TN),

False Positive (FP) and False Negative (FN) values are found on the matrix. These values are determined according to the results of the classification model. Confusion matrices with two or more classes can be used [29-33]. A two-class confusion matrix and a five-class confusion matrix used in the study are shown in Figure 3.

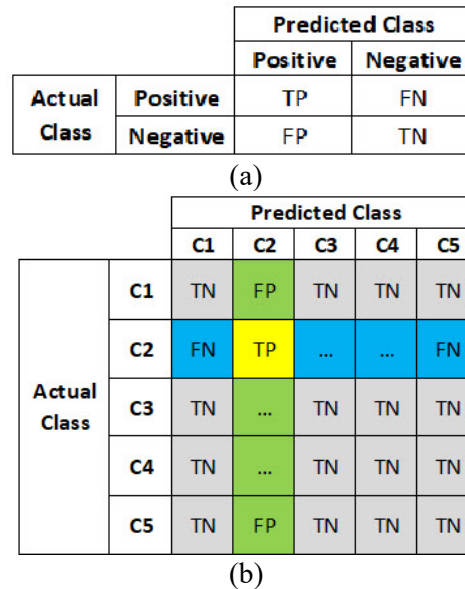


Figure 3. (a) Two class confusion matrix (b) Five class confusion matrix.

Performance metrics of models can be calculated using confusion matrix data. The formulas of the performance metrics used to evaluate the performance of the models in this study are shown in Table 2.

Table 2. Performance metrics formulas.

Metrics	Equation
Accuracy (ACC)	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100$
Precision (PSC)	$\frac{TP}{TP + FP}$
Recall (RCL)	$\frac{TP}{TP + FN}$
F-1 Score (FSC)	$2x \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, the classification operations made using Malicious Drone Dataset data are included. SqueezeNet, VGG16 and VGG19 models were used to extract the features of the images in the dataset. The parameters used in the models are as follows: Validation Frequency

5, Max Epochs 8, Mini Batch Size 11, Initial Learn Rate 0.0001, Solver sgd, L2 Regularization 0.0001, Execution Environment GPU. Obtained features are given as input to ANN, SVM and LR machine learning models. As a result of the trainings and tests conducted, confusion matrices and performance metrics were obtained for each model. Performance evaluations of the models were made according to the metrics obtained. The computer used in the study has Intel® Core i7™ 12700K 3.61 GHz, NVIDIA GeForce RTX 3080Ti, and 64GB RAM. The cross validation method was used for training and testing the models. In the cross validation method, the dataset is divided into 10 parts and each part is used as test data. The performance metrics of the classification models are obtained by taking the average of the obtained 10 classification results. As a result of using three feature extraction and three machine learning methods, 9 different classification models were obtained. Obtained results are given under headings.

3.1. SqueezeNet Features Classification Results

With the SqueezeNet CNN model, 1000 features were obtained for each image. Obtained features are given as input to ANN, SVM and LR machine learning models. Confusion matrices obtained as a result of training and testing of these models are shown in Figure 4.

The performance metrics of the classification models were created utilizing the information from the confusion matrix shown in Figure 4. The performance metrics of the 1000 feature classifications obtained from the SqueezeNet model are shown in Table 3.

In Table 3, the model with the highest accuracy in the classifications made with SqueezeNet features is the ANN model with 92%. The lowest classification accuracy belongs to the SVM model. When other performance metrics are examined, the accuracy metric in these metrics shows a similar order.

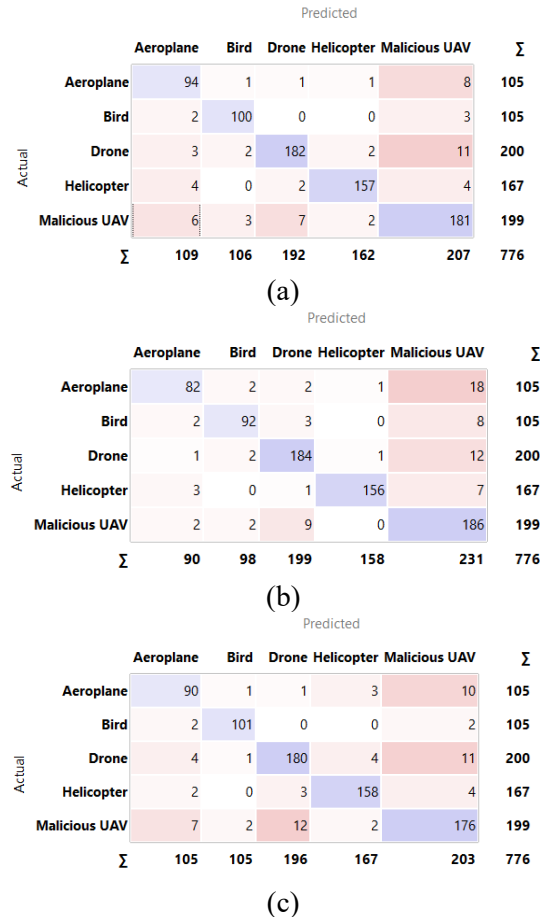


Figure 4. Confusion matrix of (a) ANN, (b) SVM and (c) LR models with SqueezeNet features.

Table 3. Performance metrics of ANN, SVM and LR models with SqueezeNet features.

	ACC	FSC	PSC	RCL	AUC
ANN	92.0%	0.92	0.921	0.920	0.990
SVM	90.2%	0.903	0.908	0.902	0.987
LR	90.9%	0.909	0.909	0.909	0.989

3.2. VGG16 Features Classification Results

4096 features were obtained for each image from the VGG16 model. Obtained features are given as input to ANN, SVM and LR classification models. Confusion matrices obtained as a result of trainings and tests are shown in Figure 5.

The performance metrics of models were calculated using the data of the confusion matrices in Figure 5. These metrics are shown in Table 4.

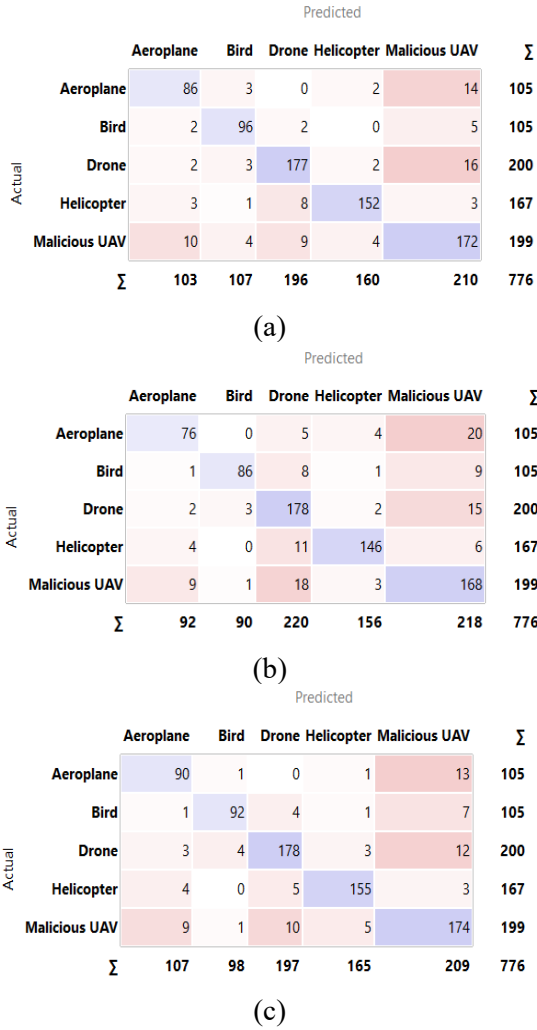


Figure 5. Confusion matrix of ANN, SVM and LR models with VGG16 features.

Table 4. Performance metrics of ANN, SVM and LR models with VGG16 features.

	ACC	FSC	PSC	RCL	AUC
ANN	88	0.881	0.882	0.88	0.977
SVM	84.3	0.843	0.849	0.843	0.974
LR	88.8	0.888	0.889	0.888	0.981

In Table 4, the model with the highest classification accuracy is the LR model. The classification model with the lowest accuracy is the SVM model. A parallel ranking to the ACC metric was observed in other performance metrics as well.

3.3. VGG19 Features Classification Results

4096 features were obtained for each image from the VGG19 model. These features are given as an introduction to the ANN, SVM, and LR models. Confusion matrices obtained as a result of the train and test operations are shown in Figure 6.

The performance metrics of the models were calculated using the data of the confusion matrices in Figure 6. The performance metrics of each classification model are shown in Table 5.

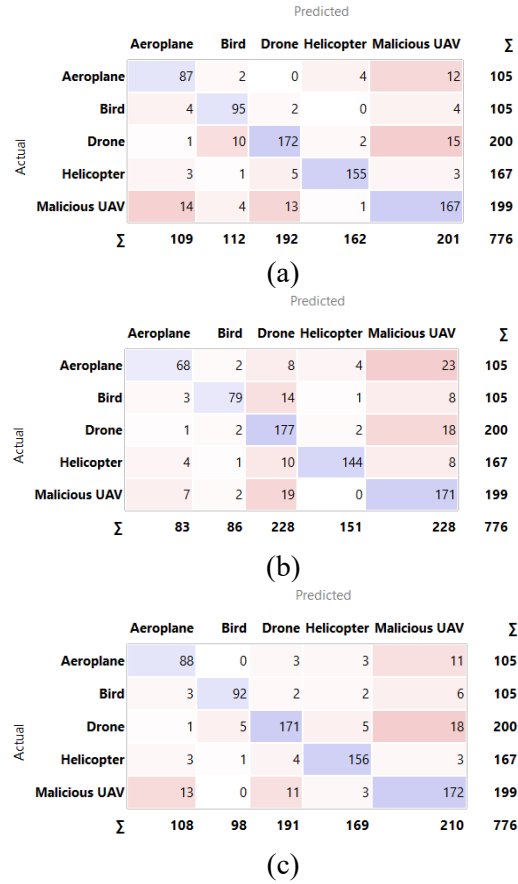


Figure 6. Confusion matrix of ANN, SVM and LR models with VGG19 features.

Table 5. Performance metrics of ANN, SVM and LR models with VGG19 features.

	ACC	FSC	PSC	RCL	AUC
ANN	87.1	0.872	0.873	0.871	0.977
SVM	82.3	0.823	0.833	0.823	0.974
LR	87.5	0.875	0.877	0.875	0.981

In Table 5, the model with the highest classification accuracy is the LR model. The SVM model has the least classification accuracy of all the models.

3.4. Comparison of All Classification Results

The features obtained from SqueezeNet, VGG16 and VGG19 models were classified with ANN, SVM and LR models and performance metrics were calculated. Classification accuracies of classification models according to all feature extraction

models are given in Table 6. Comparison graph of classification achievements is shown in Figure 7.

Table 6. Comparison of classification accuracy for all models.

	ANN	SVM	LR
SqueezeNet	92	90.2	90.9
VGG16	88	84.3	88.8
VGG19	87.1	82.3	87.7

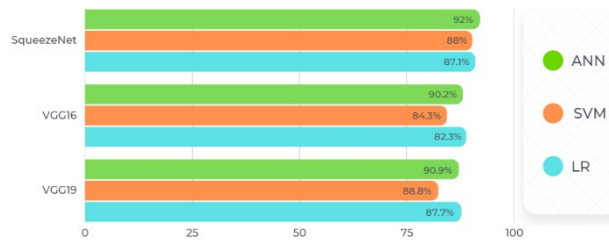


Figure 7. Classification accuracy graph.

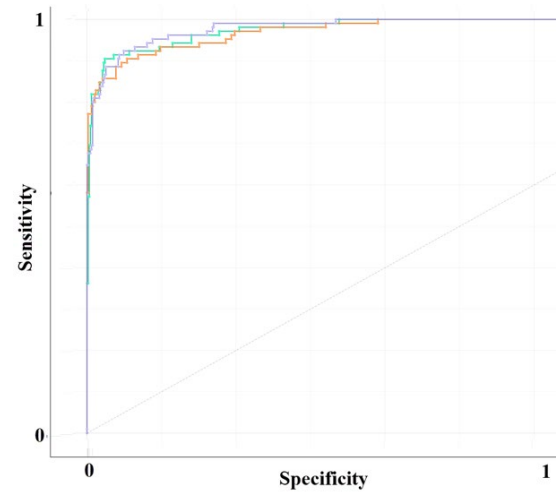
According to Table 6 and Figure 7, the highest classification accuracy was obtained from classification of SqueezeNet features with ANN. The lowest classification accuracy was obtained from the classification of VGG19 features with SVM. The train and test times of the classification models according to all feature extraction models are given in Table 7.

Table 7. Comparison of train-test time of all models (second).

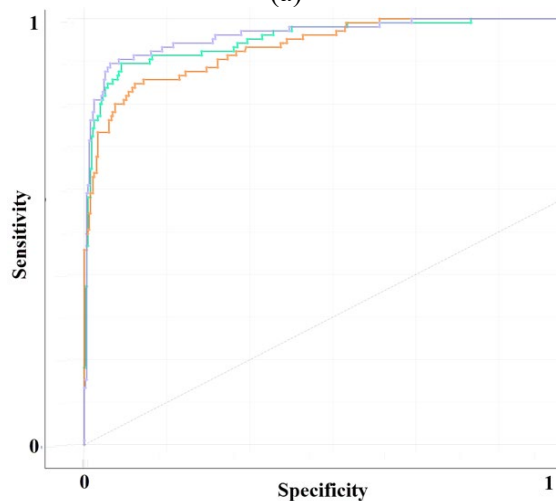
	ANN		SVM		LR	
	Tra in	Te st	Tra in	Te st	Tra in	Te st
SqueezeNet	16.0	1.8	26.9	2.7	27.1	0.9
Net	1	3	5	4	2	3
VGG16	102.	25.	159.	29.	99.9	4.2
	2	8	5	7	9	4
VGG19	61.5	7.7	121.	11.	131.	4.2
	6	3	4	8	3	

According to Table 7, the lowest train time was obtained as a result of training with SVM using SqueezeNet features. The lowest test time was obtained as a result of the test with LR using the SqueezeNet model features. The highest train time was obtained as a result of training with SVM using VGG16 features. The highest test time was obtained from the same model. Figure 8 displays the ROC curves that were produced as a consequence of the models' classification. According to Figure 8, ANN showed the highest accuracy in classifications made with SqueezeNet features. LR showed the highest

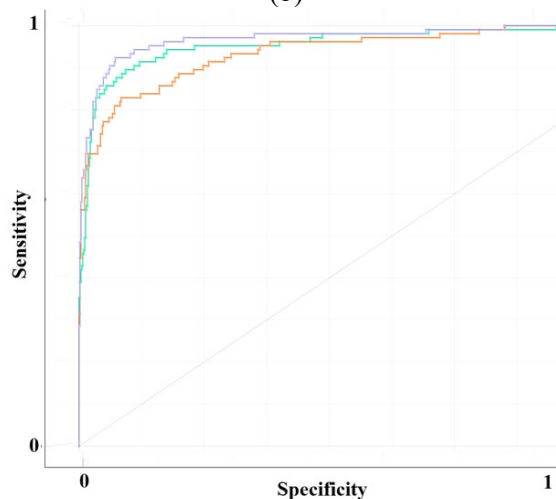
accuracy in classifications made with VGG16 and VGG19 features.



(a)



(b)



(c)

Figure 8. ROC curves of all classification models for (a) SqueezeNet features, (b) VGG16 features, (c) VGG19 features (Purple: ANN, Green: LR, Orange: SVM)

4. CONCLUSIONS

Malicious drone detection is extremely important for security. Since drones are very fast and maneuverable vehicles, they must be detected quickly and necessary precautions must be taken. Based on these problems, in this study, classification experiments of malicious drones were carried out using a dataset containing images in five different classes. SqueezeNet, VGG16, VGG19 models were used to extract the image features. Obtained features were classified by ANN, SVM and LR. As a result of the experiments, the highest classification accuracy of 92% was obtained as a result of the classification of the features obtained from the SqueezeNet model with ANN. The lowest classification accuracy The lowest classification accuracy of 82.3% was attained when the VGG19 features were classified using SVM. As a result of the experiments, it has been determined that malicious drones will be classified quickly and with high accuracy with CNN feature extraction models and machine learning models. Malicious drone detection with image processing is a low-cost method. Therefore, it can be easily integrated into defense systems. Higher classification accuracies can be achieved with different CNN models and different machine learning methods. More comprehensive and accurate classifications can be made by increasing the number of data and classes in the dataset.

REFERENCES

1. Shi, X., C. Yang, W. Xie, C. Liang, Z. Shi, and J. Chen, "Anti-drone system with multiple surveillance technologies: Architecture, implementation, and challenges", *IEEE Communications Magazine*, Vol 56, Issue 4, Pages 68-74, 2018.
2. Solodov, A., A. Williams, S. Al Hanaei, and B. Goddard, "Analyzing the threat of unmanned aerial vehicles (UAV) to nuclear facilities", *Security Journal*, Vol. 31, Issue 1, Pages 305-324, 2018.
3. Ye, D.H., J. Li, Q. Chen, J. Wachs, and C. Bouman, "Deep learning for moving object detection and tracking from a single camera in unmanned aerial vehicles (UAVs)", *Electronic Imaging*, Vol. 2018, Issue 10, Pages 466-1-466-6, 2018.
4. Basak, S., S. Rajendran, S. Pollin, and B. Scheers, "Combined RF-based drone detection and classification", *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Vol. 8, Issue 1, Pages 111-120, 2021.
5. Mezei, J., V. Fiaska, and A. Molnár, "Drone sound detection", in 2015 16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), IEEE, 2015.
6. Drozdowicz, J., M. Wielgo, P. Samczynski, K. Kulpa, J. Krzonkalla, M. Mordzonek, M. Bryl, and Z. Jakielaszek, "35 GHz FMCW drone detection system", in 2016 17th International Radar Symposium (IRS), IEEE, 2016.
7. Taha, B. and A. Shoufan, "Machine learning-based drone detection and classification: State-of-the-art in research", *IEEE access*, Pages 138669-138682, 2019.
8. Lee, D.-H., "CNN-based single object detection and tracking in videos and its application to drone detection", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 80, Issue 26, Pages 34237-34248, 2021.
9. Aker, C. and S. Kalkan, "Using deep networks for drone detection", in 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), IEEE, 2017.
10. Singha, S. and B. Aydin, "Automated Drone Detection Using YOLOv4", *Drones*, Vol. 5, Issue 3, Pages 95, 2021.
11. Jia, X., Y. Cao, D. O'Connor, J. Zhu, D.C. Tsang, B. Zou, and D. Hou, "Mapping soil pollution by using drone image recognition and machine learning at an arsenic-contaminated agricultural field", *Environmental Pollution*, Issue 270, Pages 116281, 2021.
12. Kim, B.K., H.-S. Kang, and S.-O. Park, "Drone classification using convolutional neural networks with merged Doppler images", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 14, Issue 1, Pages 38-42, 2016.
13. Mendis, G.J., T. Randeny, J. Wei, and A. Madanayake, "Deep learning based doppler radar for micro UAS detection and classification", in MILCOM 2016-2016 IEEE Military Communications Conference, IEEE, 2016.
14. Rozantsev, A., V. Lepetit, and P. Fua, "Detecting flying objects using a single moving camera", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 39, Issue 5, Pages 879-892, 2016.
15. Yoshihashi, R., T.T. Trinh, R. Kawakami, S. You, M. Iida, and T. Naemura, "Differentiating objects by motion: Joint detection and tracking of

small flying objects”, arXiv preprint arXiv:1709.04666, 2017.

16. Saqib, M., S.D. Khan, N. Sharma, and M. Blumenstein, “A study on detecting drones using deep convolutional neural networks”, in 2017 14th IEEE international conference on advanced video and signal based surveillance (AVSS), IEEE, 2017

17. Lee, D., W.G. La, and H. Kim, “Drone detection and identification system using artificial intelligence”, in 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), IEEE, 2018.

18. “Malicious Drone Dataset”, <https://www.kaggle.com/datasets/sonainjamil/malicious-drones>, October 20, 2022

19. Taspınar, Y.S., M. Dogan, I. Cinar, R. Kursun, I.A. Ozkan, and M. Koklu, “Computer vision classification of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) based on deep transfer learning techniques”, *European Food Research and Technology*, Vol. 248, Issue 11, Pages 2707-2725, 2022.

20. Taspınar, Y.S. and M. Seleğ, “Object recognition with hybrid deep learning methods and testing on embedded systems”, *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, Vol. 8, Issue 2, Pages 71-77, 2020.

21. Unal, Y., Y.S. Taspınar, I. Cinar, R. Kursun, and M. Koklu, “Application of Pre-Trained Deep Convolutional Neural Networks for Coffee Beans Species Detection”, *Food Analytical Methods*, 2022.

22. Kursun, R., I. Cinar, Y.S. Taspınar, and M. Koklu, “Flower Recognition System with Optimized Features for Deep Features”, in 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2022.

23. Iandola, F.N., S. Han, M.W. Moskewicz, K. Ashraf, W.J. Dally, and K. Keutzer, “SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5 MB model size”, arXiv preprint arXiv:1602.07360, 2016.

24. Simonyan, K. and A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition”, arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.

25. Singh, D., Y.S. Taspınar, R. Kursun, I. Cinar, M. Koklu, I.A. Ozkan, and H.-N. Lee, “Classification and Analysis of Pistachio Species with Pre-Trained Deep Learning Models”, *Electronics*, Vol. 11, Issue 7, Pages 981, 2022.

26. Kishore, B., A. Yasar, Y.S. Taspınar, R. Kursun, I. Cinar, V.G. Shankar, M. Koklu, and I. Ofori, “Computer-Aided Multiclass Classification of Corn from Corn Images Integrating Deep Feature Extraction, Computational Intelligence and Neuroscience”, Vol. 2022, Pages 2062944, 2022.

27. Koklu, M., R. Kursun, Y.S. Taspınar, and I. Cinar, “Classification of date fruits into genetic varieties using image analysis”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.

28. Yılmaz, A.B., Y.S. Taspınar, and M. Koklu, “Classification of Malicious Android Applications Using Naive Bayes and Support Vector Machine Algorithms”, *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, Vol. 10, Issue 2, Pages 269-274, 2022.

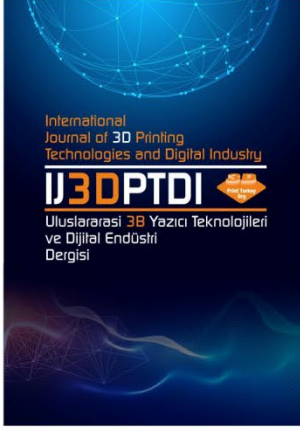
29. Koklu, M., I. Cinar, and Y.S. Taspınar, “Classification of rice varieties with deep learning methods”, *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 187, Pages 106285, 2021.

30. Ersöz, T. And F. Ersöz, “Data Mining And Machine Learning Approaches In Data Science: Predictive Modeling Of Traffic Accident Causes”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 6, Issue 3, Pages 530-539.

31. Çınarlar, G., K. Kiliç, And T. Parlar, “A Deep Transfer Learning Framework For The Staging Of Diabetic Retinopathy”, *Journal of Scientific Reports-A*, Issue 051, Pages 106-119.

32. Koklu, M. and Y.S. Taspınar, “Determining the extinguishing status of fuel flames with sound wave by machine learning methods”, *IEEE Access*, Issue 9, Pages 86207-86216, 2021.

33. Taspınar, Y. S., Cinar, I., & Koklu, M., “Prediction of computer type using benchmark scores of hardware units”, *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 20, Issue 1, Pages 11-17.




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>

DIGITAL INDUSTRIALIZATION IN THE TRANSITION TO 3D PRINTING TECHNOLOGY

Yazarlar (Authors): Erhan Özkan 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özkan E.,
“Digital Industrialization In The Transition To 3d Printing Technology” *Int. J. of 3D Printing
Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 286-294, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1296247

Araştırma Makale/ Research Article

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

DIGITAL INDUSTRIALIZATION IN THE TRANSITION TO 3D PRINTING TECHNOLOGY

Erhan Özkan^a 

^a Dikkan R&D Centre, TÜRKİYE

* Corresponding Author: erhanozkan81@icloud.com

(Received: 12.05.23; Revised: 22.05.23; Accepted: 08.08.23)

ABSTRACT

In this article, details for the increasing properties with the help of 3D printer assisted technique of a material produced by classical sand mould casting method through a technological transformation were presented. At the same time, digital transformation studies were included with the development of online data monitoring systems in mass production. After the design studies were carried out with Solidworks, design verification research with computational fluid dynamics (CFD) and finite element analysis (FEA) have been realized. Solidification, filling-time-temperature analyses, and casting simulation studies of micro and macro shrinkage were carried out using the Anycasting simulation program. Then the intensive use of simulation techniques, the activities that would increase the quality of the product with 3D printers were detailed. The microstructure investigation, chemical analyses, and mechanical tests were performed to prove the positive effect of the 3D printing system. Surface morphology determination results showed that the better outcomes have been obtained from the 3D printing reinforced system. Finally, a unique data monitoring system that could communicate with production equipment for the first time in our country without the need for any external software and license, within the scope of digital industrialization system were explained. With the commissioning of the 3D system, 44.2% increase in efficiency and 33% improvement in quality rates were achieved. The biggest advantage of this system is that the total amount of energy consumed was reduced from 197 mJ to 81 mJ.

Keywords: 3D Printing, Digital Industrialization, Digital Transformation, Casting, Additive Manufacturing.

1. INTRODUCTION

Casting is a production method that allows the production of parts by solidifying the liquid metal in a mould. Sand mould casting, which is the oldest known casting method, is widely preferred due to its low production costs [1-6]. For this reason, it has become a necessity to carry out technological transformation and digitalization in quality improvement activities as well as cost reduction studies in casting process with the traditional sand mould method of materials with different structures and geometries [7-11].

Sintering is one of the methods developed as an alternative to the traditional casting method with a technological approach [12]. Sintering can generally be defined as the joining process performed at 2/3 of the melting temperature of

the powder particles and at a rate of 0.8 times in general applications [13-14]. Sintering was initially considered under the science of powder metallurgy and was applied to metals with very high melting temperatures such as tungsten, molybdenum, vanadium. After being used in all kinds of metal applications with the advantages of working at lower temperatures, homogeneous structure, and high strength values, it was started to be applied to all ceramic, plastic and polymer materials and positive results were obtained [15-19].

Additive manufacturing, which has become one of the most up-to-date production methods of today, has also been developed by being inspired from the sintering technology [20]. 3D printers have been developed to serve this purpose and have started to be preferred in

almost all sectors such as health, defence industry, automotive and aviation sectors [21].

Two types of raw materials for 3D printers are generally used on the application. PLA (Polylactic Acid) is an organic biopolymer and thermoplastic produced from corn starch and sugar cane. Therefore, it is not harmful to human health. However, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) is often used in industry for injection moulding and is widely used in toys, tools, sporting goods, etc. equipment is produced. In general, PLA should be the filament of choice if an easy printing experience is valued over engineering features [22-25]. The comparison of the PLA vs ABS is shown in the Figure 1.

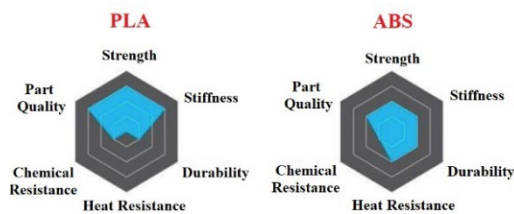


Figure 1. Comparison of PLA vs ABS [26].

If looking for a part that is more resistant to impact and will be used for a long time, ABS should be chosen [27]. As seen in Figure 2, the surface quality and colour difference produced by PLA and ABS samples for the field application can be distinguished clearly. ABS can be easily dried with hot air (perfectly dry) sources. PLA reacts differently to moisture, in addition to bubbles or spurts from the nozzle, colour change and reduction in 3D written part properties can be seen [28-31].



Figure 2. 3D printed samples appearance [26].

With the commissioning of 3D printers, studies on their adaptation to automation applications have increased and accordingly the concept of innovation has gained importance. In the Oslo Manual, innovation is defined as the whole of

systematic studies of optimizing a process, increasing efficiency, implementing the logistics and assembly system [32]. Following the development of automation systems, digital transformation strategies dealing with production systems, software and robotic applications that can organize processes have a critical importance [33-35].

Digital transformation is defined as the process in which institutions and organizations integrate their technologies into their businesses to drive fundamental change [36]. The benefit it provides; increased productivity, greater business agility and ultimately unlocking new values for employees, customers, and shareholders [37]. Examples of digital transformations include the modernization of information technologies, such as the move to a cloud environment, remote readiness, re-skilling employees, implementing automation to accelerate customer support and service, and using artificial intelligence driven insights to increase sales efficiency [38]

In this study, it is aimed to share the data details of the research carried out with the help of 3D printers of the traditional sand mould casting system, product development, process optimization and digital transformation. In the first stage, the comparison of the redesign for the mould of a part produced with the traditional casting method with a 3D printer was presented in detail. In order to make the technological transformation data obtained in the first stage meaningful, the traceability of the products produced with the help of online data monitoring systems and 3D printers, the efficiency tracking, the digital transformation of the quality analysis data was mentioned in the second stage. Finally, the advantages of the developed 3D printer assisted product and improved online data system for the digital transformation were presented with details.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Design

The initial designs of the specimen to be simulated, produced, tested, and characterized were drawn with the help of CAD (Computer Aided Design) by using AutoCAD program.

2D (two-dimensional) drawings provided the fundamentals for the design, as well as giving the designer an idea for 3D (three-dimensional)

drawings. The 3D drawings were carried out via Solidworks 3D solid modelling and design software.

2.2. Simulation

In order to determine the mechanical strength of the material and to optimize the design according to the limit values, mechanical analyses were carried out by using FEA (Finite Elemental Analysis) method in the ANSYS simulation program. The strength values of the valve designed in FEA were determined according to the boundary conditions defined in the EN 1704 standard. The parts were handled with two different numerical methods, singular and assembled, and interpolation solution was realized with the Rayleigh-Ritz method.

CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses were carried out by using ANSYS CFX module according to EN 12666 and EN 1074 standards. In CFD analysis, it was solved with the K-epsilon turbulence model, and improvements were made in the boundary layers and mesh by keeping the y^+ value at 3 and below.

Anycasting simulation program was used to produce the product with suitable mechanical design under the right conditions and to determine the production parameters. The design was carried out with single runner feeding in the simulation program. However, the data were taken as CuSn10 material and casting temperature 1150 °C.

2.3. Production

Due to its widespread use and low production cost, the materials were cast by sand mould casting method in accordance with DIN 1075 - 2.1050 standards. This standard defines the mechanical and metallurgical properties of tin bronzes. The most prominent feature of tin is that it increases the strength of the alloy. Tin bronzes are durable, hard and have very high ductility. Pump, turbine propellers, bearings operating at heavy load low rotational speed, worm and volute screw, worm gear and plain bearings.

In order to provide technological transformation with an innovative approach to the casting method, which became a traditional and outdated application, to ensure technological transformation, material production was carried out in the 3D printer. Zortrax M200 Plus model

additive equipment was used for the 3D manufacturing stage as shown in the Figure 3.



Figure 3. 3D Additive manufacturing equipment.

2.4. Characterization

Chemical analysis of the casting material was carried out with Metavision 1008 brand spectrometer. The mechanical properties of the samples were determined by notch impact and tensile tests. The samples prepared for the notch impact test were tested with an OTTO WOLPERT WERKE PW 30/15 brand machine at a temperature of 25 °C, and the samples prepared for the tensile test were tested at room temperature with an OTTO WOLPERT U-40 type tensile device.

The samples, which were moulded into polyester moulds for microstructural analysis, were grinded and polished with the STRUERS Tegrapol-21 brand grinding and polishing device by turning 90° each time with 600 grades SiC sandpaper, 220 grade 9 µm, 3 µm and 1 µm felt and diamond pastes, respectively, and made ready for the etching process. Prepared samples for the microstructure analyses were etched with 15 g FeCl₃, 75 ml HCl, 25 ml HNO₃, 25 ml H₂O solution for 10 seconds. Then, the samples were investigated with a 1000 magnification NIKON ECLIPSE LV 150 optical microscope. The hardness values were tested at room temperature with an ALBERT GNEHM brand universal hardness measuring machine with Brinell tip.

2.5. Digital Transformation

The digital transformation studies were carried out to increase the operational efficiency during the production of materials by using 3D printers.

From additive manufacturing production lines; waste, failure rate, cycle time, instantaneous temperature, pressure, filament amount, raw material rate etc. A data collection and analysis system has been developed that can record and

report the data, analyse this data, and monitor the production, and work in harmony with PLC. A data collection and analysis system has been developed that can record and report the data taken from the additive manufacturing production lines such as cycle time, instantaneous temperature, pressure, waste and failure ratio, filament amount, raw material usage etc. The developed system is a digital transformation software that is compatible with PLC (Programmable Logic Controller) and integrated to ERP (Enterprise Resource Planning) applications. Figure 4 illustrates the industrial automation pyramid for the digitalisation.

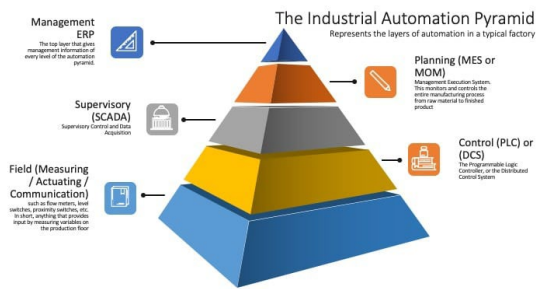


Figure 4. The industrial Automation Pyramid [38].

3. EXPERIMENTAL FINDINGS

The technical details targeted in the article for the CFD analyses in line with the requirements defined in the EN 1267 and EN 1074 standards are given in Table 1.

Table 1. Technical properties for CFD.

Properties	Unit	Value
Line Pressure	Bar	16
Fluid Velocity	m/s	5.0
Flow Coefficient	m ³ /h	52000

The parameter that would support the velocity vector analysis of this system should be its characteristic behaviour under 16 bar pressure, and velocity vector analysis was carried out. Accordingly, when the disc was in the fully open position, the resistance of the disc and the body against flow could be characterized more clearly. Innovative design trials have been carried out to suit the desired conditions. Figure 5 shows the velocity vector analysis of the system under 5 m/s. According to the research in the literature, it has been determined that there are factors that disrupt laminar flows, sharp surface change, temperature change and material resistance in valve disc materials [39-41]. As a result of these evaluations, no

problems were encountered in the CFD analysis of the disc material at a flow rate of 5 m/s, and it was observed that the flow lines were suitable in red and yellow colours.

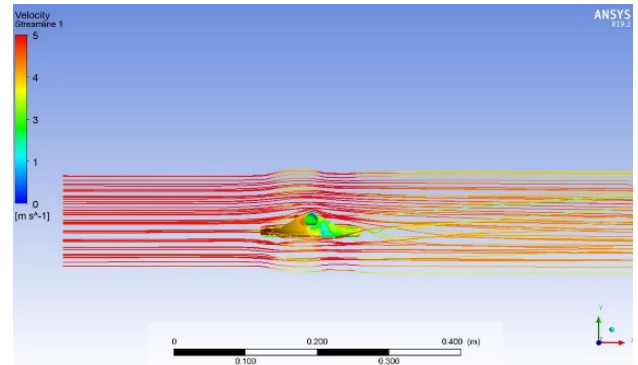


Figure 5. CFD analysis.

In order to increase the desired flow coefficient, in other words valve efficiency, various designs have been made in the disc geometry. The mechanical numerical analysis method was carried out by defining the boundary condition of ten percent of the nominal pressure for the disc materials, which were carried out by considering the yield strength values of 130 MPa. Accordingly, the mechanical analysis of the disc regarding to 18 bar, which corresponds to 1.1 times the maximum working pressure of 16 bar, is shown in Figure 6. The design developed to increase the mechanical strength of the disc exposed to the flow surface was defined by FEA and no red areas, which represent high stress zone encouraging plastic deformation, were observed.

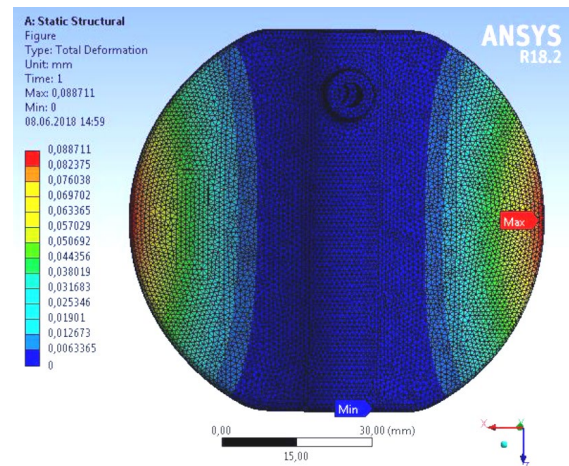


Figure 6. FEA analysis.

Anycasting simulation program was used to produce the specimen with suitable mechanical design under the right conditions and to

determine the production parameters. The design was carried out single double runner feeding in the Anycasting simulation program. In the simulation, the data was taken as CuSn10 material and casting temperature at 1150 °C. According to the simulation data, the casting process took 19 seconds. Figure 7 illustrates the casting simulation by considering heating analyses.

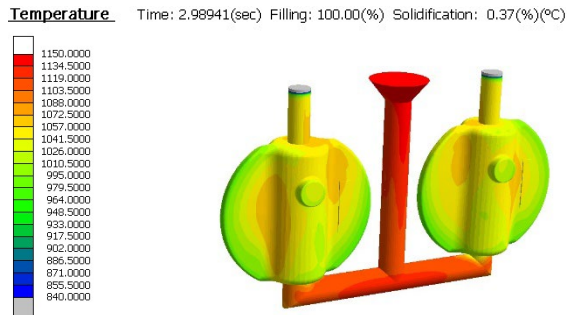


Figure 7. Casting simulation.

The chemical analysis, of the material known as CuSn10 and defined as Standard Alloy Number (C90700 / SAE 62, DIN 1075 - 2.1050, CC480K) was given in Table 2.

Table 2. Chemical analysis of the samples.

Element	Unit	Value
Cu	%	88.0-90.0
Sn	%	9.0-11.0
Zn	%	0.5 max.
Pn	%	1.0 max.
Ni	%	2.0 max.

The mechanical properties are given in Table 3 in order to define elastic and plastic limits of the materials.

Table 3. Mechanical properties of the materials.

Properties	Unit	Value
Yield Strength	N/mm ²	120-140
Tensile Strength	N/mm ²	240-260
Elongation	%	17-19
Charpy Impact Value	Joule	9-12
Hardness	HB	70-75

The casting process was carried out in accordance with the defined criteria, but the surface of the sample was not homogenous as seen in Figure 8.



Figure 8. Casted sample image

As the surface properties were far below the expectations, 3D printer was used for the production of the materials. The manufacturing was carried out with support angle 30°, nozzle diameter 0.4 mm, maximum wall thickness 3.13 mm. ABS was chosen as the filament material due to its high temperature and mechanical resistance. Additive manufacturing took 3 h 28 m and used 14.77 m (35 g) of ABS material. The details and final product image were shown in the Figure 9.

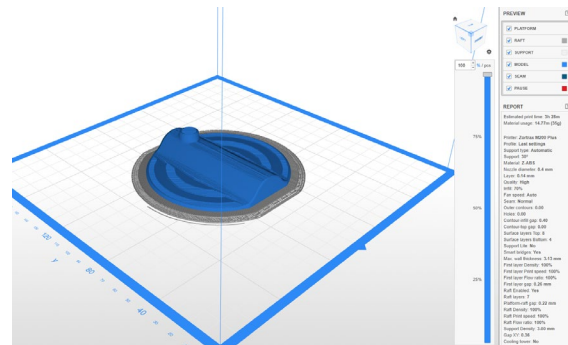


Figure 9. Additive manufacturing zone and layer parameters

The visual of the mould model obtained from the 3D printer is shown in the Figure 10. As can be seen in this image, dimensional tolerances, and product quality display a high appearance.



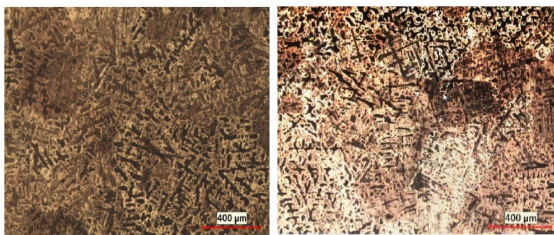
Figure 10. Additive manufacturing mould.

Figure 11 illustrates the surface quality of the material produced by the 3D printer combination. The surface quality is quite high that does not include any cracks, porosities, fracture etc.



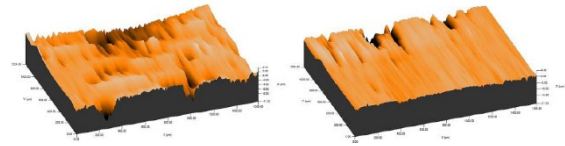
Figure 11. 3D moulded specimen

The determination of microcracks, porosities, inclusion, and any other defects were carried out by investigation of the microstructures. Figure 12 shows the microstructure comparison of cast and 3D printer supported samples. While no fracture and porosity were observed in both microstructures, the dendritic structure was more clearly observed in the products produced with the help of 3D printers. This homogeneity is due to the stable data of the 3D system.



(a) Casted (b) 3D printer assisted
Figure 12. Microstructure of the samples.

The product surfaces were compared according to the inside-out characterization methodology and this difference was clearly observed in Figure 13. The surface quality of the products produced with the help of 3D printers is more homogeneous and more stable.



(a) Casted (b) 3D printer assisted
Figure 13. Surface of the samples.

Within the scope of digital transformation, for the first time in our country, an online data monitoring system, which can communicate with 3D printer benches without using any middleware and can operate without the need for an external software and license, has been implemented. This digital production management system is the summary definition of the automation system that aims to remove the data entry initiative of the personnel working in the production and to move the factories to higher levels in their 3D manufacturing sector with higher efficiency and competitive costs with the introduction of digital control systems. Topology optimization, within a design material distribution depending on specific load and boundary conditions, desired design and it is a design technique that enables to reach production. With the developed software topology, a system that can communicate between the machines in production in an integrated way without the need for any interface connection has been obtained. The topology algorithm was developed in Matlab environment, and Gekko optimization was used in the application of the topology phase. Figure 14 shows the topology of this system.

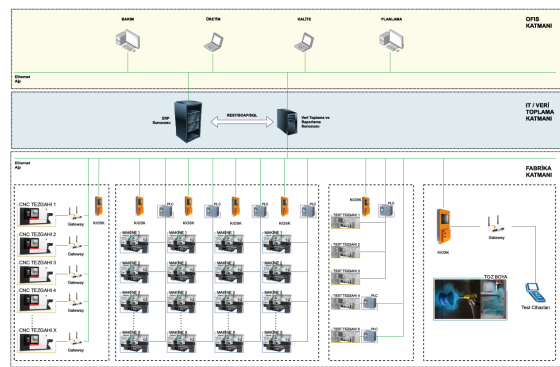


Figure 14. Topology of the digital transformation system.

Thanks to the developed digital system, in addition to production capacity and speed, productivity has increased significantly, standard products have been produced by reducing error rates, problems and malfunctions

can be minimized. Moreover, quick solutions can be offered, general situation control might be made with detailed system analysis, and malfunctions can be made independently by the operator. Figure 15 shows the screenshot of the software system where the digital transformation was provided.



Figure 15. Digital transformation software system screenshot.

4. RESULTS

In this article, a detailed comparison of 3D printer systems for the development of traditional casting method and studies of digital conversion systems developed as a result of this comparison were presented.

Methodologies and measurement systems were implemented to increase energy, labour, process, and operational efficiencies by using natural resources efficiently, and this comparison was made according to more concrete data. Table 4 helps to understand this comparison by details.

Table 4. Comparison 3D method.

Parameters	Traditional Product	3D Printer
Material Type	CuSn10	CuSn10
Temperature (°C)	1150	1150
Quality Rate (%)	67	100
Efficiency (%)	42.7	86.9
Surface Quality (Ra)	0.81	0.02
Total Energy (mJ)	197	81

According to the online data monitoring results of the 3D printer system, it has been observed that it is 44.2% more efficient and 33% higher quality than the traditional casting method for the same material and at the same temperature. Total consumed energy for the production of 3D system is 81 mJ where the traditional casting method needs 197 mJ. A distinguished difference was observed between the surface qualities of the resulting products of these two

systems. Surface roughness of the 3D printed system was measured as 0.02 ηm , moreover traditional casting method gives 0.81 ηm surface asperity value, that is 40 times higher than 3D printer method.

5. DISCUSSION

It has been determined that the data related to the digital transformation of 3D printers in businesses have not been discussed in detail from the design to the final product in previous studies. Moreover, all the details from design to production, from characterization to digital transformation were handled with data and this condition makes this study unique. Therefore, specific studies can be carried out for manufacturing sectors by considering the data given in this manuscript with details. Finally, with the digitalization of 3D printers, a significant increase in efficiency values was detected, and it is also quite effective in improving quality and reducing costs.

6. CONCLUSION

The motivation that started this work was to present its technological transformation with 3D printer systems to bring an alternative and innovative approach to the traditional casting method. However, it was to convey the details of the digital transformation in the new production method obtained to the readers with its data.

Today, it has become an inevitable reality to integrate all kinds of technological transformation with digital transformation in order to better demonstrate its success. In this study, savings in material, labour and time were achieved and detailed information about the academic and commercial studies of high-efficiency, low-cost products were given. The details of design development and process improvement studies, which are the two important points of reducing costs today, were given together and a privileged study was presented with a different approach. A synthesis of 3D printers, which is an important topic of today, and digital industry concepts, which is a popular topic, has been shared with the readers.

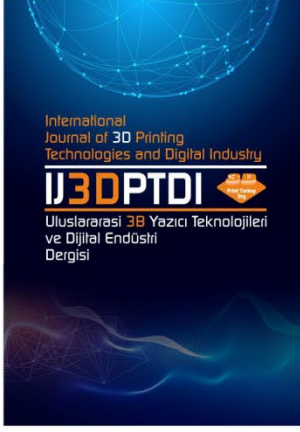
7. ACKNOWLEDGEMENT

I would like to thank TÜBİTAK for their support from the beginning to the successful conclusion of my project within the scope 3210662.

REFERENCES

1. Sadarang, Jain, Ramesh Kumar Nayak, and Ishim Panigrahi. "Challenges and future prospective of alternative materials to silica sand for green sand mould casting: A review." *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 74, Pages 2939-2952, 2021.
2. Kumaraswamy, J., et al. "Wear behaviour of the Ni-Cu alloy hybrid composites processed by sand mould casting." *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 1, Pages 1-13, 2022.
3. Sampath, Boopathi. "Improving of green sand-mould quality using Taguchi technique." *Journal of Engineering Research*, Vol. 9, Pages 112-129, 2021.
4. Saxena, Prateek, et al. "Sustainability metrics for rapid manufacturing of the sand casting moulds: A multi-criteria decision-making algorithm-based approach." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 311, Pages 127-146, 2021.
5. Yajjala, Ravi Kanth, Narasimha Murthy Inampudi, and Babu Rao Jinugu. "Correlation between SDAS and mechanical properties of Al-Si alloy made in Sand and Slag moulds." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, Pages 6257-6267, 2020.
6. Zheng, Jun, et al. "An influence modelling and analysis method of reducing carbon emissions for mould forming processes in patternless sand casting." *International Journal of Production Research*, Vol. 61, Pages 1624-1641, 2023.
7. Shan, Zhong-de, et al. "Performance of digital patternless freeze-casting sand mould." *China Foundry*, Vol. 17, Pages 308-313, 2020.
8. Behera, Nirmal Chandra, et al. "Parametric appraisal of strength & hardness of resin compacted sand castings using hybrid Taguchi-WASPAS-Material Generation Algorithm." *Materials Today: Proceedings*, Vol.50, Pages 1226-1233, 2022.
9. Malik, Soubhagya, et al. "Parametric appraisal of collapsibility and core shrinkage of phenol binded unbaked casting moulds using Taguchi-Sunflower optimization algorithm." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, Pages 1138-1144, 2022.
10. Vinothraj, D., et al. "Heat dissipation and inter-relationship between physical properties of moulding sand." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 37, Pages 1809-1812, 2021.
11. Borikar, Ganesh P., and Sandip T. Chavan. "Optimization of casting yield in multi-cavity sand moulds of al-alloy components." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 28, Pages 819-824, 2020.
12. Kunčická, Lenka, Radim Kocich, and Zuzana Klečková. "Effects of sintering conditions on structures and properties of sintered tungsten heavy alloy." *Materials*, Vol. 13, Issue 2338, 2020.
13. Matějček, Jiří, et al. "Spark plasma sintered tungsten–mechanical properties, irradiation effects and thermal shock performance." *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 542, Issue 152518, 2020.
14. Li, Xingyu, et al. "Towards pressureless sintering of nanocrystalline tungsten." *Acta Materialia*, Vol. 220, Issue 117344, 2021.
15. Ye, Jiahao, et al. "DBTT and tensile properties of as-sintered tungsten alloys reinforced by yttrium-zirconium oxide." *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 578, Issue 154318, 2023.
16. Biesuz, Mattia, Salvatore Grasso, and Vincenzo M. Sglavo. "What's new in ceramics sintering? A short report on the latest trends and future prospects." *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 24, Issue 100868, 2020.
17. Karanam, Sai Ashish Kumar, et al. "Optimizing the Parameters of Spark Plasma Sintering to Enhance the Hardness of MgO/TiC Composites." *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 119, Pages 118-125, 2023.
18. Grasso, Salvatore, et al. "A review of cold sintering processes." *Advances in Applied Ceramics*, Vol. 119, Pages 115-143, 2020.
19. Awad, Atheer, et al. "3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering." *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 586, Issue 119594, 2020.
20. Jiménez, Mariano, et al. "Additive manufacturing technologies: an overview about 3D printing methods and future prospects." *Complexity*, Vol. 520, Pages 115-125, 2019.
21. Najmon, Joel C., Sajjad Raesi, and Andres Tovar. "Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry." *Additive manufacturing for the aerospace industry*, Vol. 7, Pages 756-862, 2019.
22. Kumar, Rishi, et al. "A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed Product with PLA, ABS & PETG Materials." *Procedia CIRP*, Vol. 107, Pages 15-20, 2022.
23. Lay, Makara, et al. "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and

- injection molding." *Composites Part B: Engineering*, Vol. 176, Issue 107341, 2019.
24. Parast, Mohammad Sadegh Aghareb, et al. "Bending fatigue behavior of fused filament fabrication 3D-printed ABS and PLA joints with rotary friction welding." *Progress in additive manufacturing*, Vol. 7, Pages 1345-1361, 2022.
25. <https://www.3dnatives.com/en/pla-vs-abs-which-material-080820224/>, May 1, 2023.
26. Kakanuru, Padmalatha, and Kishore Pochiraju. "Moisture ingress and degradation of additively manufactured PLA, ABS and PLA/SiC composite parts." *Additive Manufacturing*, Vol. 36, Issue 101529, 2020.
27. Algarni, Mohammed, and Sami Ghazali. "Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters." *Crystals*, Vol. 11, Issue 995, 2021.
28. Ahmed, Hafiz, et al. "Impact Toughness of Hybrid Carbon Fiber-PLA/ABS Laminar Composite Produced through Fused Filament Fabrication." *Polymers*, Vol. 13, Issue 3057, 2021.
29. Roy, Rahul, and Abhijit Mukhopadhyay. "Tribological studies of 3D printed ABS and PLA plastic parts." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 41, Pages 856-862, 2021.
30. Ahmed, Syed Waqar, et al. "On the effects of process parameters and optimization of interlaminar bond strength in 3D printed ABS/CF-PLA composite." *Polymers*, Vol. 12, Issue 2155, 2020.
31. Arunprasath, K., et al. "Dynamic mechanical analysis performance of pure 3D printed polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS)." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, Pages 1559-1562, 2022.
32. https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_file/BT-YPD/kilavuzlar/canberra_tr.pdf, May 1, 2023.
33. Safitri, Vera Apridina, Lindriana Sari, and Rindu Rika Gamayuni. "Research and Development (R&D), Environmental Investments, to Eco-Efficiency, and Firm Value", *The Indonesian Journal of Accounting Research*, Vol. 22, Pages 3-18, 2020.
34. Kazekami, Sachiko. "Mechanisms to improve labor productivity by performing telework", *Telecommunications Policy*, Vol. 44, Issue 101868, 2020.
35. Iris, Çağatay, and Jasmine Siu Lee Lam. "A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 112, Pages 170-182, 2019.
36. Flammer, Caroline, Bryan Hong, and Dylan Minor. "Corporate governance and the rise of integrating corporate social responsibility criteria in executive compensation: Effectiveness and implications for firm outcomes", *Strategic Management Journal*, Vol. 40, Pages 1097-1122, 2019.
37. Dong, Kangyin, Yue Dou, and Qingzhe Jiang. "Income inequality, energy poverty, and energy efficiency: Who cause who and how?", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 179, Issue 121622, 2022.
38. Audretsch, David B., and Maksim Belitski. "The role of R&D and knowledge spillovers in innovation and productivity.", *European economic review*, Vol. 123, Issue 103391, 2020.
39. Guzei, D. V., A. V. Minakov, and V. Ya Rudyak. "On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 139, Pages 180-192, 2019.
40. Li, Rongbin, et al. "Effect of shear on the thickness of wax deposit under laminar flow regime." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 181, Issue 106212, 2019.
41. Shi, Hanbin, et al. "Numerical study of heat transfer in square millimetric zigzag channels in the laminar flow regime." *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 144, Issue 107624, 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>

HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND GREY WOLF OPTIMIZER FOR SETTING PID PARAMETERS OF BLDC MOTORS

Yazarlar (Authors): İlhan Koçaslan^{ID*}, Yavuz Üser^{ID}, Utku Köse^{ID}




Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koçaslan İ., Üser Y., Köse U., “Hybrid Particle Swarm Optimization and Grey Wolf Optimizer for Setting PID Parameters of BLDC Motors” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 295-302, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1321945

Araştırma Makale/ Research Article

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

HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND GREY WOLF OPTIMIZER FOR SETTING PID PARAMETERS OF BLDC MOTORS

İlhan Koçaslan^a , Yavuz Üser^a , Utku Köse^b 

^a Akdeniz University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronic Engineering, TÜRKİYE

^b Süleyman Demirel University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, TÜRKİYE

* Corresponding Author: kocaslanilhan1@gmail.com

(Received: 03.07.23; Revised: 09.08.23; Accepted: 14.08.23)

ABSTRACT

BLDC (Brushless DC) motors have advantages over asynchronous motors and dc motors in various aspects. Particularly in electric bicycles and flying cars, BLDC motors are utilized widely. Electric bicycles and flying cars are becoming increasingly popular, and as a result, the significance of BLDC motors and their cost-effective and efficient utilization has been growing rapidly. PID (Proportional Integral Derivative) controllers are generally used in motor control because they are cheap and perform well. Many methods have been used to adjust PID parameters. Although methods such as Ziegler-Nichols, Cohen-Coon etc. are widely used, there are also new methods such as optimization algorithms PSO (Particle Swarm Optimization), Whale Optimization Technique, Gray Wolf Optimization technique etc. The hybrid method: HPSOGWO (Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Grey Wolf Optimizer) is a combination of PSO and GWO (Grey Wolf Optimizer) techniques, and it can be used for tuning PID parameters. As associated with this, the aim of this study is to show the superiority of HPSOGWO algorithm in optimizing the PID parameters. In the content of this study, the essentials regarding the optimization background, and details of the BLDC motor modeling was explained first. After that, the methodology of the hybrid solution was expressed and then the application phase was explained in detail, by including the results generally. In the context of the intelligent optimization approach of this study, the results were obtained in the MATLAB Simulink environment. The application of the used solution method revealed its superiority over the study conducted solely with GWO in various parameters.

Keywords: BLDC Motors, Particle Swarm Optimization, Grey Wolf Optimizer, Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Grey Wolf Optimizer, Intelligent Optimization.

1. INTRODUCTION

BLDC (Brushless DC) motors has a remarkable role in industrial applications. Although there are many motors used in various fields of industry, BLDC motors ensure many advantages when compared with other motors having no commutator-brush part. BLDC motors have also a popularity since they are connected with electrical devices. For example, use of BLDC motors in electric bicycles has been increasing day by day nowadays [1]. In the industry, 90% of the BLDC motors are controlled using PID controllers [2]. The main reasons for this are their simplicity, reliability, and robustness [1]. The adjustment of the PID controller values to optimal values is very important for increasing energy efficiency,

faster motor response, etc. As moving from the explanations so far, the main objective of this study is associated with improving the energy efficiency by using more optimal PID parameters. There are classical tuning methods such as Ziegler-Nichol and Cohen-Coon for adjusting the PID parameters. While these methods yield favorable outcomes, there are optimization techniques that provide even superior results.

As a result of constraints and practical difficulties associated with current approaches, optimization-dependent techniques have been widely developed in the intelligent optimization literature [3]. Some of the techniques used are known as PSO (Particle Swarm Optimization),

GA (Genetic Algorithms), WOA (Whale Optimization Algorithm), and the ACO (Ant Colony Optimization). GA has been used in PID tuning of DC motors and has been shown to be more successful than classical methods [4]. WOA has been used in PID tuning for trajectory tracking [5]. ACO has been used for PID tuning [6]. Recently, it has been shown that the GWO (grey wolf optimization) technique is more successful in PID tuning and has produced better results than the PSO algorithm in some aspects [2]. Finally, the number of hybrid algorithms has increased and, in particular, a successful algorithm has been obtained by hybridizing the PSO and GWO algorithms. It has been shown that such hybrid algorithm (HPSOGWO) has faster convergence in many aspects [7]. The aim of this study is to show that the HPSOGWO algorithm, which is a hybrid algorithm, gives better results than the PSO and GWO algorithms. One advantage of employing a hybrid approach is analyzing the outcomes by the combination of the optimization mechanisms by two different optimization algorithms. The motivation for utilizing the hybrid method in our study has been its superior performance in test functions.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1 BLDC Motor Modeling

In order to model BLDC motors in the Simulink environment, the first step is to create their mathematical model. It can be stated that a BLDC motor has three phases, and these three phases facilitate the effective rotation in the motor. Assuming that there is an equal resistance in the context of all the phase windings regarding the BLDC motor, the equation used for the phase voltages is as follows:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

The equation above represents the equation providing the coil voltages of the BLDC motor. If we consider the scenario where the self-inductance of each phase winding is assumed to be the same, it implies that the phase inductances are equal as well:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \tag{2}$$

In the equation 2, ‘L’ represents the inductance, which denotes the interaction degree between the magnetic fields of the windings. On the other hand, ‘M’ represents the mutual inductance, which signifies the magnetic coupling between two different windings.

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{cb} = L_{bc} = L_{ca} = L_{ac} = M \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{4}$$

If we assume that all the phase windings are equal to zero, we are able to construct the mathematical model:

$$\dot{i}_a = \dot{i}_b = \dot{i}_c = 0 \tag{5}$$

$$M\dot{i}_a + M\dot{i}_c = -M\dot{i}_a \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{7}$$

2.2 PID Controller Design

The PID controller is typically composed of the sum of past, future, and current error estimates. These effects can be observed in the equation below:

$$PID = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{8}$$

Here, Kp represents the proportional gain, Ki is associated with the integral gain. On the other hand, the Kd is used for the derivative gain. The basic aim of a PID controller is to diminish the disparity between the desired value and the actual collected value. Some effects found here can be given a value of zero for some systems. Operating the PID controller with appropriate coefficients for the system has important benefits such as energy savings, fast convergence to the desired values, and increased work per unit time. There are various

classical and advanced methods for finding the appropriate values. Successful results have been obtained using methods that use optimization techniques in these methods [2-3]. Better results can be obtained by using new optimization techniques.

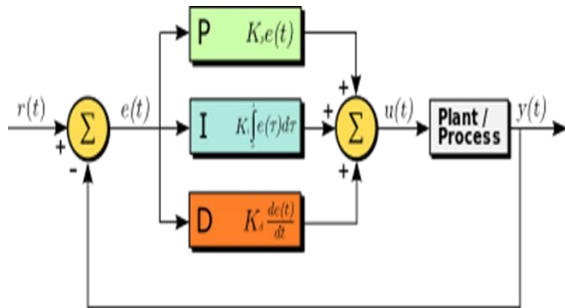


Figure 1. PID controller structure [8].

The image above shows the basic PID structure.

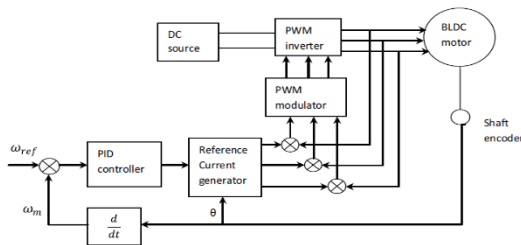


Figure 2. Complete diagram of PID controlled BLDC motor[2].

In the first figure shown above, we see the structure of a classical PID, and in the second figure, we see the structure of a PID-controlled BLDC motor.

2.3 Particle Swarm optimization Technique

The concept of PSO was first put forwarded by Kennedy, J. and Eberhart, R.C in 1995 [9]. PSO imitates the behavior of birds hunting in a swarm and trying to find food sources while staying away from hunters. Each bird inside the PSO is called as particle, and the aim of each particle is to find the optimum paramter(s)for the objective function. In a typical PSO flow, the particles strive to discover the optimal solution within the search space. Each particle possesses two state variables, namely its current position and velocity, which are initially assigned randomly. After per iteration, the location and speed of each particle are adjusted on the basis of the equation provided below. Each step creates a temporary solution for the problem. In finding these solutions, each particle knows the previously found local best

position and global best position [9]. In addition to this, a linearly decreasing weight also reduces the momentum of the particles as the iteration increases [10]. By adding various additions to the initial method, more new methods have been developed [11]. By using the self-adaptive weight method among these methods, more challenging problems can be overcome [11].

$$v_i(t + 1) = w \cdot v_i(t) + Q_1 \cdot \Phi_1(p_i(t) - x_i(t)) + Q_2 \cdot \Phi_2((g_i(t) - x_i(t))) \tag{9}$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \tag{10}$$

$$i = N^+ \tag{11}$$

The velocity and positions of particles are updated as shown above. The new velocity $v(t+1)$ and the new position $x(t+1)$ of the particle are determined. The inertia weight "w" in equation 8 is referred to as the factor that signifies the extent of directional change. Q1 and Q2 are constants with positive values. Phi1 (Φ_1) and Phi2 (Φ_2) are haphazard numbers developed from a equal distribution between 0 and 1. The variables p(i) and g(i) represent, respectively, the local and global best positions of the particle. Equation 9 is utilized to determine the particle's latest position by incorporating these values. PSO is good for solving single-objective problems [10].

2.4 Grey Wolf Optimization Technique

The Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm is known as a remarkable meta-heuristic optimization technique that draws inspiration from the behavior and hierarchical structure observed in grey wolves in their natural habitat. It was proposed firstly by Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis in 2014. GWO emulates the hunting mechanism and management hierarchy exhibited by grey wolves as a means to tackle optimization problems. In GWO, four solutions are generated, and best is the "alpha" solution. The other solutions are "beta", "delta", and "omega". GWO has been proven to be a competitive optimization technique when compared to other existing methods.

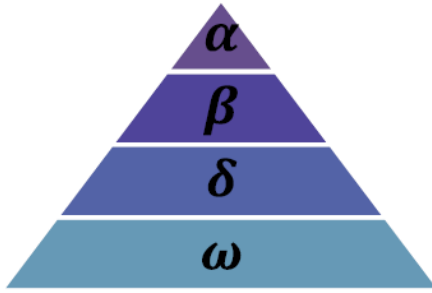


Figure 3. PID controller structure [12].

The picture above illustrates the positions of grey wolves in the social hierarchy. The hunting process of grey wolves comprises three fundamental steps:

1. Detecting, pursuing, and closing in on prey
2. Chasing, encircling, and pushing the prey up to it halts
3. Initiating an assault on the prey

2.5 Mathematical model

In order to develop an optimization technique by inspiring from the hunting behavior seen in grey wolf groups, it is generally necessary to understand how they hunt their prey. The hunting behavior of grey wolves when they attack their prey has been mathematically modeled. These fundamental steps are hunt containment, hunting, attacking the prey. These stages are described below.

2.5.1 Hunt Containment

The mathematical model that describes how grey wolves surround their prey during the exploration operations can be represented as follows:

$$\vec{D} = |\vec{F} \cdot \vec{K}_p(t) - \vec{K}(t)| \tag{12}$$

$$\vec{K}(t + 1) = \vec{K}_p(t) - \vec{Z} \cdot \vec{D} \tag{13}$$

In the given equations, ‘t’ is for the current iteration value whereas ‘ \vec{Z} ’ and ‘ \vec{F} ’ are for the associated constant vectors. Additionally, the location vector of the prey is denoted as ‘ \vec{K}_p ’, and ‘ \vec{K} ’ is related to the position vector regarding the grey wolf. These equations are used to depict the hunting patterns of grey wolves and can help to understand and optimize the process of tracking, surrounding, and attacking prey.

The vectors \vec{Z} and \vec{F} are the following.

$$\vec{Z} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{i}_1 - \vec{a} \tag{14}$$

$$\vec{F} = 2 \cdot \vec{i}_2 \tag{15}$$

\vec{i}_1 and \vec{i}_2 represent stochastic vectors, while \vec{a} progressively diminishes from 2 to 0 over the iterations. This technique is shown in 2D and 3D below.

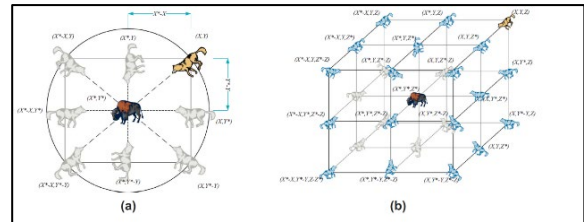


Figure 4. 2D and 3D vectors [12].

2.5.2 Hunting

Within the realm of grey wolves, the pursuit of prey hinges upon the alpha wolf, with the belief that the alpha, beta, and delta members possess superior knowledge regarding the prey's whereabouts. The other wolves refresh their locations accordingly. The alpha holds the highest rank, followed by beta and delta.

$$D_\alpha = |\vec{F}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, D_\beta = |\vec{F}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, D_\delta = |\vec{F}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \tag{16}$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \tag{17}$$

$$\vec{X}(t + 1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \tag{18}$$

In the given equations, "t" signifies the current iteration, " \vec{X} " represents the position vector of the grey wolf. α, β, δ represent the positions of wolves in the hierarchy.

2.5.3 Attacking the prey

Finally, grey wolves stop moving in order to attack the prey. As can be seen in the figure below, they attack the prey when $|\vec{A}| < 1$. One drawback of the GWO algorithm is that it can get stuck in local solutions.

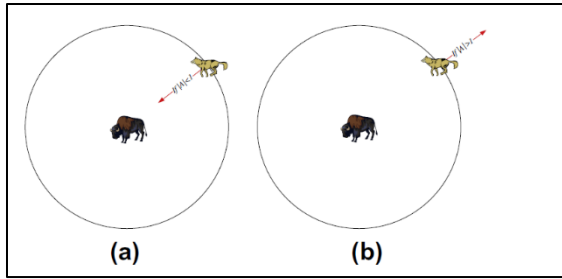


Figure 5. Attacking the prey [12].

Presented below is the pseudo-code that outlines the algorithm's logic and operations:

```

Initialize the grey wolf population  $X_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Initialize  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
Calculate the fitness of each search agent
 $X_\alpha$ =the best search agent
 $X_\beta$ =the second best search agent
 $X_\delta$ =the third best search agent
while ( $t < \text{Max number of iterations}$ )
    for each search agent
        Update the position of the current search agent by equation (3.7)
    end for
    Update  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
    Calculate the fitness of all search agents
    Update  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , and  $X_\delta$ 
     $t=t+1$ 
end while
return  $X_\alpha$ 
    
```

Figure 6. Algorithmic representation of code

2.6 Hybrid PSO AND GWO Algorithms

It is important for an optimization technique to have equilibrium between exploration and exploitation capabilities [13]. The core concept behind the hybrid method is to enhance the exploitation capabilities of PSO by leveraging the exploration abilities of the GWO algorithm [7]. The goal of combining these abilities is to reach the global minimum faster. There are significant advantages over PSO and GWO in test function measurements. The hybrid method also performs significantly better than traditional techniques on real-world problems [14]. However, the PSO method has also been hybridized with other optimization techniques, and the main goal in these studies is to avoid the local optimum and approach the global optimum [15,16]. These techniques, tested on test functions, have shown significant differences [17]. The mathematical model of the modified technique is given below.

$$D_\alpha = |\vec{F}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - w * \vec{X}|, D_\beta = |\vec{F}_2 \cdot \vec{X}_\beta - w * \vec{X}|, D_\delta = |\vec{F}_3 \cdot \vec{X}_\delta - w * \vec{X}| \quad (19)$$

$$V_i^{k+1} = w * (V_i^k + f1r1(X_1 - X_i^k) + f2r2(X_2 - X_i^k) + f3r3(X_3 - X_i^k)) \quad (20)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (21)$$

In the given equations, ‘t’ is related to the current iteration value whereas the ‘ \vec{X} ’ stands for the position vector regarding the grey wolf. A , β , δ represent the positions of wolves in the hierarchy.

It has been shown that the HPSOGWO method has a significant result in fixed-dimension, unimodal, multimodal and test missions [7]. Outlined below is the pseudo-code that illustrates the operational steps of the hybrid method:

Table1. Algorithmic representation of technique [18].

1	Start
2	Set the related GWO as well as PSO parameters including population size value and iteration
3	Determine / model the cost function
4	Create starting populations (in a random way), and calculate accordingly the fitness alpha, beta, delta
6	Apply position update for each wolf
7	Pass to the PSO steps
8	Recall the updated positions
9	Update the values for a, A, and c. For each wolf, calculate the fitness value.
10	Update the values for alpha, beta, and delta positions regarding wolf
11	If the final iteration is not reached go back to the step 6
12	Ending of the algorithm

3. RESULTS

The motor parameters used in the simulation are given below, and the simulation photos of the circuit in the MATLAB environment are attached. ITAE was selected as the fitness function because it performs well [2].

$$ITAE = \int_0^\infty t * |e(t)| dt \quad (22)$$

Table 2. BLDC motor parameters

BLDC Motor Parameters	Values
RS	0.5 ohm
L	8 mH
J	0,0465 kg.m ²
K	0.55 kg.m/A
b	0.004 N.m.sec / rad
I_a	10 Amp.
V	12 V
P	84W
Ψ_m	65 mV/rad/sec
T_p	2.9 N.m
p	8

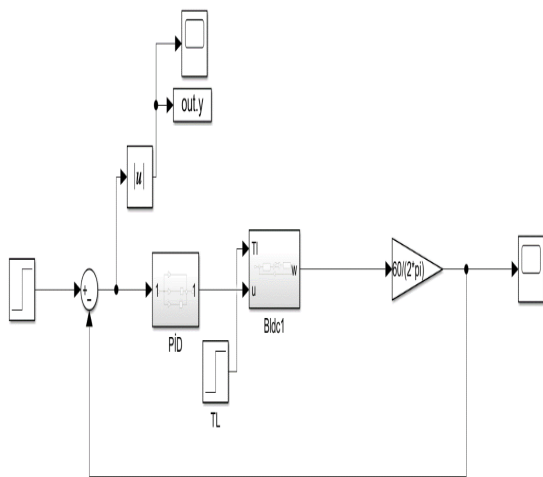


Figure 7. PID block diagram

The image above displays the model established in the Simulink environment.

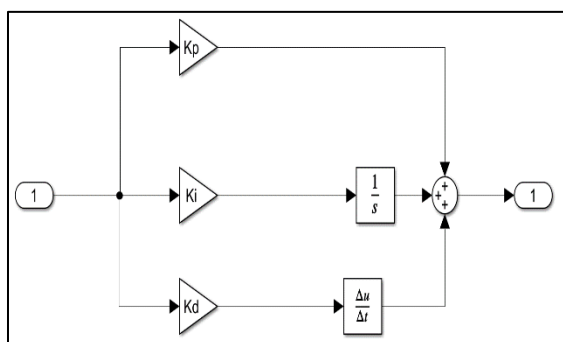


Figure 8. BLDC motor control circuit

The PID structure block can be observed above.

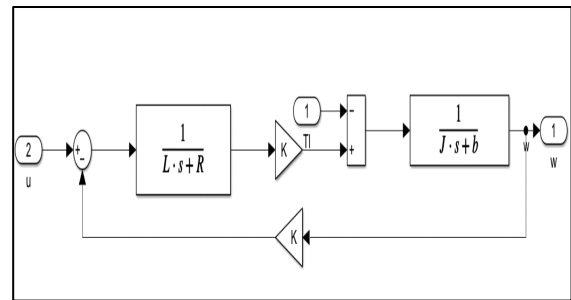


Figure 9. BLDC block diagram

The Simulink block for the BLDC motor is presented in Figure 11. In the simulation, certain parameters are assigned first. The error signal obtained from the BLDC control circuit is taken and the absolute value of this error signal is calculated. After that, the integral value is calculated to be evaluated as the objective function. Here, the objective for the function is minimization. In the simulation, 30 particles and 50 iterations were selected for GWO, PSO and the hybrid solution. Also, the boundary parameters were taken as $lb = [-0.5 -0.5 0]$, $up = [1 1 0.3]$. After the initial parameters are assigned, each optimization technique is run separately to obtain results.

4. DISCUSSION

In previous studies, optimization-based methods have been observed to yield better results when compared with the related classical methods. In the comparison of the GWO and PSO methods, it was found that the GWO method is significantly superior in some values. It was found that the alpha score of the GWO method is 0.0167, while it is 0.0116 for the HPSOGWO method. There is already a research work, which is available on the superiority of the GWO and PSO algorithms [2]. In this study, the superiority of the HPSOGWO method over GWO and PSO is emphasized.

Table 3. PID results

	GWO	HPSOGWO
RiseTime	0,125	0,0889
SettlingTime	0,224	0,14
SettlingMin	0	0
SettlingMax	4,8982	2,7265
Overshoot	6,70E+06	1,11E+08
Undershoot	0	0
Peak	50	50

From the applications performed in this study, it was seen that the hybrid method gives better findings in terms of determining time and rise time. As provided in Figure 12, GWO and HPSOGWO optimization techniques were compared for the calculation of coefficients used in the control of a BLDC motor (under certain conditions). The superiority of the GWO technique over the PSO technique is demonstrated already in [2]. The greatest advantage of the hybrid method is that it incorporates characteristics from both techniques. The hybrid method has integrated exploration capabilities of both GWO and PSO. Therefore, the HPSOGWO technique yields better results in certain aspects, with lower values for determining time, overshoot, and rise time when the sum of these values is considered. From all of this, it can be seen that the proposed method yields significantly better results than the others. By combining this method with other techniques, better results can be achieved. One of the most crucial features that requires attention is that these techniques involve randomness, which can have both advantages and disadvantages. Additional studies can be conducted by modifying boundary parameters.

5. CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this study, an optimization approach for PID adjustment of BLDC motors was introduced. In detail, the study employed PSO and GWO as the solution methods, and a hybrid solution way, which is called briefly as HPSOGWO was used for ensuring improved results. According to the results, the HPSOGWO was better according to single use of PSO or GWO. Eventually, the study showed that the widely used BLDC motors can be effectively optimized thanks to hybrid intelligent optimization. Also, it was seen that such use of optimization methods is always ensuring the potential of advancing the literature, which is requiring more accurate adjustments with the technological advancements.

As connected with the study, future works may be planned for contributing to the industrial applications. It may be planned to use the same HPSOGWO solution for alternative devices and components. Also, different optimization techniques may be recalled to create alternative hybrid solutions for the PID-based adjustment of BLDC motors. In more advanced

applications, parameters of the BLDC motors may be evaluated deeply, by considering more challenging factors for working conditions.

REFERENCES

1. Izza, A., Jamaaluddin, U., I, R., W, W., "Identification and implementation hybrid fuzzy logic and PID controller for speed control of BLDC motor", *Journal of Physics: Conference Series 4th Annual Applied Science and Engineering Conference*, Bali, 2019.
2. Pallav, D., Santanu, K, N., "Grey Wolf Optimizer Based PID Controller for Speed Control of BLDC Motor", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 16, Pages 955-961, 2021.
3. Embiruçu, M., Neto, A, C., "Tuning of PID Controllers: An Optimization-Based Method", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 33, Pages 367-372, 2000.
4. Neenu, T., P, P., "Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 2009.
5. Loucif, F., Kechida, S., Sebbagh, A., "Whale optimizer algorithm to tune PID controller for the trajectory tracking control of robot manipulator", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, 2019
6. Hsiao, Y., Chuang, C., Chien C., "Ant colony optimization for designing of PID controllers", *International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*, Taiwan, 2004
7. Narinder, S., S, B, S., "Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Grey Wolf Optimizer for Improving Convergence Performance", *Journal of Applied Mathematics*, Vol 2017.
8. The Electronics and Robotics Club, "PID Controller", https://erc-bpge.github.io/handbook/automation/ControlTheory/PID_Controller/, April 20, 2023
9. Riccardo, P., James, K., Tim B., "Particle swarm optimization", *Springer Science + Business Media*, Vol. 1, Pages 33-57, 2007.
10. Seyedali, M., Jin S, S., "Multi-Objective Optimization using Artificial Intelligence Techniques", *Springer*, Germany, 2020.
11. Yuhui, S., Russell C, E., "Empirical study of particle swarm optimization", *Proceedings of the*

1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99, Washington DC, 1999.

12. Seyedali, M., Seyed, M, M., Andrew, L., “Grey Wolf Optimizer”, *Advances in Engineering Software*, Vol. 69, Pages 46-61, 2014.

13. Xin-She, Y., “Swarm intelligence based algorithms: a critical analysis”, *Evolutionary Intelligence*, Vol. 7, Pages 17-28, 2014.

14. Fatih, A, Ş., Fatih, G., Asım, S, Y., Tunncay Y., “A novel hybrid PSO–GWO algorithm for optimization problems”, *Engineering with Computers*, Vol. 35, Pages 1359–1373, 2019.

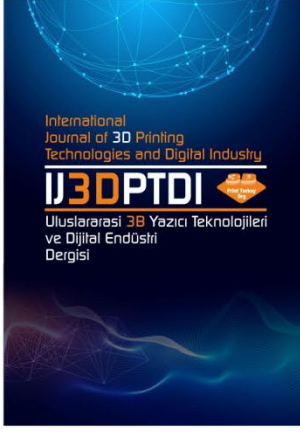
15. Duangjai, J., “A hybrid differential evolution with grey wolf optimizer for continuous global optimization”, *International Conference on*

Information Technology and Electrical Engineering, Chiang Mai, 2015.

16. Mohamed, A, T., A, F, A., “A Hybrid grey wolf optimizer and genetic algorithm for minimizing potential energy function”, *Memetic Computing*, Vol. 9, Pages 347-359, 2017.

17. Narinder, S., Satya, B, S., “A novel hybrid GWO-SCA approach for optimization problems”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 20, Pages 1586-1601, 2017

18. Shaheen, A, M, M., Hasaniien, M, H., Alkuhayli, A., “A novel hybrid GWO-PSO optimization technique for optimal reactive power dispatch problem solution”, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 12, Pages 621-630, 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>

CNC TEZGAHLARININ DİJİTAL İKİZ MODELİ İLE KOMUT TAMAMLANMA SÜRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMAL
PERFORMANCE IN THERMOELECTRIC GENERATORS

Yazarlar (Authors): Elif Cesur , Muhammet Raşit Cesur , Beyza Nur Aydoğan 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): 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.*, 7(2): 303-321, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1215353

Araştırma Makale/ Research Article

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

CNC TEZGAHLARININ DİJİTAL İKİZ MODELİ İLE KOMUT TAMAMLANMA SÜRELERİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Elif Cesur^a, Muhammet Raşit Cesur^a, Beyza Nur Aydoğan^b

^aİstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

^bYıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Veri Bilimi ve Büyük Veri Programı, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: elif.karakaya@medeniyet.com

(Received: 06.12.22; Revised: 07.07.23; Accepted: 18.08.23)

ÖZ

Endüstride dijital dönüşümün başlamasıyla fiziksel sistemlerin dijital ortamda modellenerek üretim verimliliğinin artması için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar mevcut yöntemlere kıyasla daha karmaşık sorunları çözmek, maliyet ve kalite açısından daha etkin üretim yapmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Dijitalleşme çalışmalarında yapay zekâ ve makine öğreniminin endüstriyel operasyonlara dahil edilmesi oldukça önemli bir adım olmuştur. IoT ile entegre yapay zekâ ve makine öğrenimi, veri toplama, işleme ve bilgi çıkarımın tek bir yerde yapılmasına izin verdiği için büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Bu teknolojilerin kullanıldığı alanlardan biri ise Dijital İkiz (Dİ) uygulamalarıdır. Dİ ile, gerçek dünyanın sanal ortamda birebir modeli oluşturularak sistemlerin gerçek zamanlı kontrolü sağlanmaktadır. Endüstriyel kontrolde Dİ teknolojisinin uygulanabileceği en etkin bileşenler ise 3 boyutlu yazıcılar, robotlar ve CNC tezgâhlarıdır. Bu çalışmada, öncelikle üretim sistemlerinin Dİ modelinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise geliştirilen Dİ modeli ile esnek imalat sistemi tezgâhlarında doğrusal hareket komutlarının tamamlanma süresi tahmin edilmiştir. Tahmin aşamasında birden çok makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. 0.995745 R² ve 0.991615 doğruluk değerleri ile Yapay sinir ağları modeli en iyi yöntem olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Zeki İmalat Sistemleri, CNC tezgâhları.

THE DIGITAL TWIN MODEL OF CNC MACHINES TO ESTIMATE OPERATION COMPLETION TIMES

ABSTRACT

As digital transformation takes hold in the industry, studies are exploring how modeling physical systems in digital environments can boost production efficiency. The objective is to tackle more complex issues than traditional methods and achieve more cost-effective and higher-quality production. The integration of artificial intelligence and machine learning into industrial processes is a very important step in digitalization studies. Integrating artificial intelligence and machine learning using the Internet of Things (IoT) has shown great potential, as data collection, processing, and extraction can be done through a single platform. One of the areas where these technologies are being used is in the Digital Twin (DT) applications. Digital transformation enables real-time control of systems by creating a virtual environment that mirrors the real world. The most effective targets for applying DT technology in industrial control are 3D printers, robots, and CNC benches. In this study, the main objective is to develop a DT model for manufacturing systems. In the second phase of the study, the execution time of linear motion commands on machines of flexible

manufacturing systems was estimated using the developed DT model. In the estimation phase, different machine learning algorithms were used and their performances were compared.

Keywords: Digital Twin, İntelligent Manufacturing Systems, CNC Workbench.

1. GİRİŞ

Dijital dönüşüm endüstride otonom teknolojilerin geliştirilmesini ve veri odaklı planlamaya yönelik çok sayıda çalışma yapılmasını sağlamıştır [1-5]. Özellikle bilgi ve iletişim teknolojilerinin yaygınlaşması ve gelişimi otomasyonda yapay zekâ ve makine öğrenimi kullanımını yaygınlaştırmış ve daha karmaşık kontrol sistemlerinin gelişimine olanak sağlamıştır. Zeki kontrol sistemlerinin endüstriyel operasyonlara dahil edilmesi de oldukça önemlidir. Bu alanların endüstride kullanımının artmasıyla birlikte sağladıkları faydalar rekabeti daha da artırmaktadır. İşletmeler rekabette yer edinebilmek için yapay zekaya odaklanacağından, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile en az ilgilenen işlerin sektörden ilk ayrılan işler olacağı düşünülmektedir [6]. Yapay zekanın gelişimi nesnelerin interneti (IoT) teknolojisi ile desteklendiğinde çevrelerinin farkına varan nesnelerin üretimi mümkün hale gelmektedir [7]. Özellikle günümüzde internete insanlardan daha fazla cihaz bağlı [8] olduğu düşünüldüğünde dijital dönüşümün çok hızlı gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Dijital dönüşümün ana bileşenlerinden biri olan Dİ teknolojisi, fiziksel bir varlığın sanal ortamda tüm davranışlarının modellenmesi ve fiziksel varlığın kontrolünde kullanılmasını kapsamaktadır [9]. Dİ, gelişmiş sensör teknolojileriyle bir maddenin, sürecin veya bir öğenin gerçek zamanlı izlenimini yapabilir. Bununla birlikte görsel olarak da modellenmesi sağlanır. Eksiksiz olarak geliştirilen ve gerçekleştirilen bir Dİ modeli ile, sistemlerin güvenliği artırabilmektedir [10]. Aynı zamanda üretim maliyetlerini azaltırken sürecin yönetimine de katkıda bulunabilmektedir. Dİ'in ilerleyen zamanlarda geleneksel üretim süreçlerinin değişiminde yadsınamaz bir rolü olacağı düşünülmektedir. Dijital dönüşümün hızı ve dijital alt yapıdaki gelişim düşünüldüğünde Dİ teknolojisindeki gelişimin

bu dönüşümün tamamlanmasına katkı sağlayacağı yadsınamaz bir gerçektir.

Firmaların üretim maliyetlerini düşürme, ürünlerini daha kısa sürede üretme, taleplere daha çabuk karşılık verme, aynı zamanda bunları gerçekleştirirken üretimde yaşanan aksamaları kaldırma isteği güncel bir konu olarak tartışılmaktadır. Endüstri 4.0'la bu ihtiyaçlara çözüm olarak gerçek zamanlı karar verebilme yetisine sahip nesnelerin arayışı ön plana çıkmıştır. Bu doğrultuda akıllı üretim, simülasyon modelleri, tahminlere odaklı yazılımlar, gerçek zamanlı izleme ile verimliliğin ve esnekliğin artırılması amaçlanmıştır [11-12]. Endüstrinin günümüz ihtiyaçları ve amaçları doğrultusunda Dİ yeni bir trend olarak baş göstermiştir. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, özellikle son beş yılda gelişme süreci oldukça hızlanmıştır. Bu süreçte akıllı üretim sistemlerin hassas simülasyon, kendini algılama, kendinden ayarlama, kendini tahmin etme, öz değerlendirme şeklinde nitelikler kazandığı ifade edilebilir [13].

Makine Öğrenimi (ML), endüstride en yaygın kullanılan uygulamalardan biridir. ML, verilerden öğrenebilen ve tahminler yapabilen yapay zekanın (AI) bir alt kümesidir ve algoritmalara odaklanır. Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman, Naive Bayes, KNN ve Lojistik Regresyon gibi algoritmalar makine öğrenimi algoritmalarıdır. Makine öğrenme algoritmaları Dİ oluşturmak için de ayrıca kullanılan araçlardan biridir. Dİ çalışmalarında veri karakteristiklerine göre algoritmalar kullanılır ve arka planda çeşitli parametrelerle ML algoritmalarını deneyerek en iyi modeli ve en iyi parametreyi çıktı olarak döndürür.

Bu çalışmada üretim sistemlerinin Dİ modelinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Esnek imalat sistemini oluşturan tezgahlarda (CNC, 3B yazıcılar, robotlar) doğrusal hareket komutlarının yürütme süresini tahmin eden bir

Dİ modeli geliştirilir. Dİ modeli, önerilen aşamalar ile herhangi bir CNC tezgahı simüle etmeyi amaçlar. İlk aşama veri toplama aşamasıdır. İkinci aşama, yapay zekâ modelini eğitmek için veri ön işleme adımlarının gerçekleştirilmesidir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında ise makine öğrenmesi algoritmaları ile modellenmek istenen komutların tamamlanma sürelerinin tahmini yapılacaktır.

Bölüm 2 Dİ ve kullanım alanlarına yönelik literatür taramasını, Bölüm 3 bu alana yönelik teorik arka planı sunmaktadır. Bölüm 4 yöntemler hakkında bilgi sağlamaktadır. Bölüm 5 konunun uygulama kısmını içermektedir. Burada örnek veri üzerinden yapılan vaka çalışmaları ve analizler bulunmaktadır.

2. DİJİTAL İKİZ KAVRAMI VE GELİŞİMİ

Dİ teknolojisi son zamanlarda yüksek ilgi görmüştür. Dünyanın en yetkili bilişim ve teknoloji araştırma ve danışmanlık firması Gartner, 2016'dan bu yana ilk on stratejik teknoloji trendinden biri olarak Dİ'yi seçmiştir. Dünyanın en büyük silah üreticisi Lockheed Martin, Dİ dünyadaki en iyi altı teknolojidenden ilki olarak sıralamıştır. 2017'de savunma ve havacılık endüstrisi, Çin Bilim ve Akıllı Üretim Derneği akademik konsorsiyumu, Dİ akıllı üretim montajını 2017'de akıllı üretimdeki ilk 10 bilimsel ve teknolojik ilerlemeden biri olarak seçmiştir. NASA'nın Apollo uzay programı, 'ikiz' konseptini kullanan ilk programdır. Program, dünyadaki uzay aracının uzaydaki diğerinin koşullarını yansıtabilmesi, simüle edebilmesi ve tahmin edebilmesi için iki özdeş uzay aracı inşa etmiştir. Dünyada kalan araç, uzayda görev yapan aracın ikizidir [14]. Dİ terminolojisinin ilk kullanımı kentsel yol ağlarının tasarımında yinelemeli değişiklikler için Dİ kullanımı ile ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, terminolojinin ilk olarak 2003 yılında Michigan Üniversitesi'nde Michael Grieves tarafından "fiziksel bir ürüne dijital eşdeğer" olarak tanıtıldığı yaygın olarak kabul edilmektedir [15]. "Ürün avatari" kavramı 2006 yılında tanıtılmıştır [16], Dİ'e benzer bir kavramdır. Ürün avatar konsepti, ürün merkezli perspektiften iki yönlü bir bilgi akışını destekleyen bilgi yönetimi mimarisini

oluşturmayı amaçlamıştır. Ürün avatariyle ilgili araştırmalar 2015'ten önce bulunabilir [17-19]. Ancak o zamandan beri ürün avatar konseptinin yerini Dİ'in aldığı görülmektedir. Dİ'in ilk ayrıntılı tanımı NASA tarafından verilmiştir [20]. Dr. Grieves kavramı sunduğundan ve NASA ilk spesifik tanımı verdiğinden beri, Dİ ile ilgili çok sayıda literatür yayınlanmıştır.

2.1. Dİ Uygulama Alanları

Montaj görevlerini gerçekleştirmek üzere robotla veya insan gücü ile koordine edilebilen esnek bir üretim hücresinin Dİ'ni oluşturmak ve nesne yönelimli bir simülasyon oluşturmak arasındaki farklılıklar tartışılmaktadır. Dİ, bir üretim sisteminin tasarım aşamasında geliştirilen sanal simülasyon modellerinin kullanımını gerçek zamanlı kontrol operasyonlarına, insan ve robot arasında dinamik beceriye dayalı görev dağılımına, görevlerin sıralanmasına ve buna göre robot programı geliştirmeye kadar genişletir. Metodoloji, esnek insan-robot çalışma ekiplerine giden yolda insan-robot iş birliğinde yalın manuel montaj yöntemlerini birleştirir. Bilberg vd. arkadaşlarının [21] kullandığı, insan-robot iş birliğinin 3 boyutlu sanal simülasyon modelidir. Tecnomatix Process Simulate yazılımı seçilir ve deney sırasında simülasyon aracı olarak kullanılır. Sonuçlar, yaklaşımın montaj esnekliğini korurken otomasyon kavramını desteklediğini göstermektedir.

Meng vd. arkadaşları [22], Robotik montaj sistemi için sanal simülasyon modeli, davranış modeli ve bilgi modelini içeren dijital bir ikiz modeli sunar. Dİ modele dayalı olarak, endüstriyel robotun bileşeni ilk konumundan hedef konuma hareket ettirmesi için çarpışmasız bir yol oluşturmak üzere olasılıksal yol haritası yöntem (PRM) planlayıcısı gerçekleştirir. Planlanan yol, robot çevrimdışı programcısı tarafından hareket dizilerine çevirir. Deney sonuçları, önerilen yöntemin hızlı bir şekilde çarpışmasız bir montaj yolu planlayabildiğini ve ardından endüstriyel robotu otomatik, güvenli ve verimli bir şekilde büyük ölçekli bileşenlerin kurulumunu tamamlamak için kontrol edebildiğini gösterir. Liu vd. arkadaşları [23], otomatikleştirilmiş akış

atölyesi üretim sisteminin hızlı bireyselleştirilmiş tasarımı için Dİ güdümlü bir metodoloji sunar. Dİ'in sistem davranışını tanımlamada ve optimize etmede nasıl uygulanacağını tartışır. Konfigürasyondaki tasarım değişkenlerinin analizinin yanı sıra süreç kısıtlamalarını ve karmaşık bağlantı ilişkilerini karşılamak için gereken dinamik yürütme mekanizması aracılığıyla, bu makale 'statik konfigürasyon ve dinamik yürütme arasında yinelemeli tasarım optimizasyonu' fikrini önermektedir. Amaç, konfigürasyon maliyeti minimizasyonu ve sistem performans maksimizasyonu arasında ortak bir optimizasyon olarak tanımlanır. Botkina vd. arkadaşları [24], bir kesici takımın Di'ni anlatır. Kesici takım verileri gösterimi ve değişimi ISO 13399 ve hat bilgi sistemi mimarisi LISA için uluslararası standardı temel alır. Standartlaştırılmış verileri otomatik olarak toplayan ve dijital modelin sürekli ayarlanmasını sağlayan bir bilgi modeli geliştirilir. Ayarlama, bir tweet makinesi aracılığıyla yapılır. Ayarlanan model, kesici takımın özelliklerini doğru bir şekilde temsil eder ve hassas süreç simülasyonu, kontrolü ve analizine uygulanabilir ve nihayetinde üretim sürecinin sürekli iyileştirilmesine yol açar. Üretim atölyesinde Dİ uygulaması uygulandığında, atölyedeki makine ve ürünlerin durumu gerçek zamanlı olarak sanal modele yansıtılmakta ve bu sayede ürünün imalatı daha akıllı hale getirilmektedir.

2.2. CNC, 3D Yazıcılar ve Dİ

Şu anda, CNC takım tezgâhları üzerine yapılan araştırmalar, esas olarak arıza tespiti, hata kompanzasyonu, parametre optimizasyonu vb. üzerine odaklanmaktadır ve bunlar, arıza tespit verimliliğini ve CNC takım tezgahlarının işleme hassasiyetini büyük ölçüde geliştirmektedir. CNC takım tezgâhları üzerine yapılan araştırma, ürünlerin, akıllı takım tezgahlarının ve yeşil imalatın çevrimiçi gerçek zamanlı izlenmesini de genişletilecektir. Birçok araştırmacı, CNC takım tezgâhları üzerinde akıllı imalatla ilgili araştırmalar yapmıştır.

Bozdemir [25], yapay zekâ destekli bir kavramsal tasarım modelini takım tezgahlarına uygulamıştır. Bu model için bir yapay zekâ

programı uygulaması geliştirmiştir. Bu program kullanarak sistematik tasarımın şartname ve kavramsal tasarım aşamaları arasında hızlı bir bilgi akışı sağlanmaktadır. Bu sayede tasarım işlem süresinin kısalması ve tezgâhın tasarım maliyetlerinde bir düşüş sağlanacaktır.

Sevli [26] , 3D yazıcılara ait çeşitli ayar parametreleri ve üretilecek ürünün niteliklerini ifade eden bir veri seti üzerinde çalışmıştır. Bu verilerle basım için kullanılacak malzemenin tahminlemesine yönelik makine öğrenmesi temelli sınıflandırmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmayla 3D imalat sektöründe isabetli öngörülerde bulunmak, üretim sürecini daha etkin hale getirip ideal maliyetlerle kaliteli ürünler oluşturma konusunda yol gösterici sonuçlar ortaya koymak amaçlanmaktadır.

Altunkaynak vd. arkadaşları [27], 5 eksen 3D yazıcının tasarımı ve prototip üretimini gerçekleştirmiştir. Prototip üretilen 3D yazıcıda geleneksel Kartezyen tip hareket eksenleri (X, Y ve Z) ile yazıcı tablasının dönüş hareketini sağlayan (A ve C) eksenler eklenerek 5 eksenli 3D yazıcı elde edilmiştir. Geleneksel 3D yazıcı ile kıyaslandığında, destek malzemesinin 5 eksen 3D yazıcıda kullanılmamasından dolayı zamandan tasarruf ve daha az hasarlı bölgelere sahip bir ürün elde edilmiştir.

Wanga vd. arkadaşları [28], birleştirilmiş çok gövdeli besleme tahrik sistemlerinin aslına uygun dinamik modellerini oluşturmak için yeni bir yaklaşımı tanıtır. Yaklaşım oldukça geneldir ve seri kinematikli geniş birtakım tezgâhlara ve robotlar sınıfına uygulanabilir. Model tahmini, doğrusal olmayan ve doğrusal dinamiklerin önerilen ayrıştırması nedeniyle oldukça verimlidir. Yeni yaklaşım, kısa proses içi CNC veri paketleri aracılığıyla 5 eksenli lazer delme makinesi için Dİ tahmininde gösterilmiştir. Liu vd. arkadaşları [29], CNC takım tezgahının hareket eksenini için zamanla değişen hata tahminini incelemiş ve fiziksel varlık için değişen trendi tahmin etmede Dİ'i uygulamıştır. Isı transfer teorisi ve görsel modele dayalı zamanla değişen bir hata modeli içeren hareket ekseninin Dİ'i, zamanla değişen hatayı tahmin etmek ve telafi etmek için kullanıma hazır bir yazılım olarak

oluşturulmuştur. Bir iş parçası için delik aralığı zamanla değişen hatanın tahmin deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, Dİ'e dayalı zamanla değişen hata tahmini ve telafi yönteminin etkili ve uygulanabilir bir şema olduğunu göstermektedir. Dİ'e dayalı hareket ekseninin termal deformasyonu için 3 boyutlu gerçek zamanlı Dİ ilk kez oluşturulmuştur.

Kabaldin vd. arkadaşları [30], CNC makinelerinde ark kaynağı ile 3D baskı için bir sistem geliştirmiştir. Yüksek hızlı hesaplama ve sinir ağlarının eğitimi (geri bildirim ile) için modüller, kaynak işlemini optimize etmek ve ürün kalitesini iyileştirmek için bu 3D baskı sistemine bağlanabilir. Dİ, CNC makineleri için kontrol programları ve ekipman hazırlamada CAM sistemlerinin yeteneklerini genişletir. Paripooranan vd. arkadaşları [31], bir kullanıcının iki yönlü bilgi alışverişini destekleyen etkileşimli bir arayüz oluşturmasını sağlayarak veri görselleştirmesini ve kontrolünü geliştirmeye yardımcı olan 3D baskı için artırılmış gerçeklik özellikli Dİ'in bir uygulamasını önermiştir. Bu uygulama metodolojisi, fiziksel nesnenin 3-D CAD modeline ve 3-D CAD modelini artıran bir arayüze sahip olarak, çoklu kullanım durumlarına genişletilebilir. Özel olarak oluşturulmuş bir uygulama, kullanıcının özellikleri görüntülemesine ve fiziksel nesneyi kontrol etmesine olanak tanır.

Luo vd. arkadaşları [13], Dİ tarafından yönlendirilen CNC takım tezgâhı (CNCMT) için hibrit bir kestirimci bakım yöntemi önermiştir. Bu yöntem, Dİ modeline dayalı parçacık filtreleme algoritması ile kaynaştırılır ve Dİ verileriyle çalıştırılır. Bu yöntem ile Dİ modeli çoklu alan üzerine kurulur ve gerçek çalışma koşullarını yansıtır. Dİ verileri farklı tipte sensörler tarafından toplanır ve veriye dayalı Kalan Faydalı Ömür (RUL) tahmin modeli için kullanılır. Daha sonra sistem gözlem değeri ile teorik türetme değeri parçacık filtreleme algoritması ile birleştirilir. Bu yöntem, Dİ modelinin ve verilerin daha iyi entegre edilmesini ve uygulanmasını sağlar. Bu sayede tek stratejili yöntemle göre daha doğru bir sonuç verebilir. Önerilen yaklaşımın geçerliliği ve doğruluğu, CNCMT kesici takım

ömrü tahmininin bir vaka çalışması ile doğrulanmıştır. Zhang vd. arkadaşları [32], CNC makinelerinin güvenli çalışmasını sağlamak için, kademeli arızaya dayalı bir arıza teşhis stratejisi önermiştir. Arıza mekanizması analizine göre, takım tezgâhı sistemlerindeki bileşenler arasında arıza yayılımının yönlendirilmiş bir grafik modeli kurulur. Bu çalışmada, fay yayılma modelinin hiyerarşik yapısını matris dönüşümü ve ayrıştırma yoluyla gerçekleştirmek için yorumlayıcı yapısal model yöntemi kullanılmıştır. Ardından, takım tezgâhı sistem bileşenlerinin arıza etkilerini değerlendirmek için PageRank algoritması tanıtılır. Johnson yöntemi daha sonra bileşen arıza sırasını düzeltmek ve zaman korelasyonuna dayalı arızaların meydana gelme oranı modelini oluşturmak için uygulanır. Sonunda, yöntemin geçerliliğini doğrulamak için bir uygulama örneği olarak bir takım tezgâhı ekipmanı kullanılır. Bu yöntem, bakım süresinin azaltılmasında, sistemin güvenilirliğinin artırılmasında ve takım tezgâhı sisteminin güvenli çalışmasının sağlanmasında önem arz etmektedir.

Villalonga vd. arkadaşları [33], CNC takım tezgâhları için koşul tabanlı izleme mimarisinin genel tasarımını ve uygulamasını tanıtır. Öneri, CNC takım tezgâhlarındaki alarmları ve olayları yönetmek için çok sayıda yerel gömülü işleme modülü için bilgi toplamak üzere bir hizmet olarak buluta dayalı küresel bir modül çözümünü entegre ediyor. Çözüm, bileşenleri, öğeleri ve grup davranışlarını izlemek ve takım tezgâhı yaşam döngüsü boyunca arıza modellerini tahmin etmek için sinyal işleme, modelleme, optimizasyon ve karar verme tekniklerini birleştirir. Son olarak, her durumda kullanıcı, diğerlerinin yanı sıra geçmiş verilere, gerçek makine göstergelerine, bileşen durumuna erişim, duruma dayalı izleme sistemi üzerinde tam kontrol elde etmek için yerel modülde uygulanan yerel işlemlere erişebilecektir. Ayrıca, bir grup mesaj, uyarı ve alarm, kullanıcıya, tüm makine durumu tabanlı izleme sistemi için basit bir tahmin eyleminden bulut sistemi tarafından sağlanan yeni bir kararlı güncellemeye kadar her durumda dikkate alınması gereken prosedürü sağlar. Luo vd. arkadaşları [34], CNC takım tezgâhı

(CNCMT) için bir modelleme yöntemi ve Dİ kullanım stratejisi önermiştir. CNC takım tezgâhı çağında Dİ konseptinin bir gösterimi sunulmaktadır. İlk olarak, CNCMT için bir Dİ modelleme ve uygulama çerçevesi önerilir. İkinci olarak, birleşik modelleme dili ve haritalama stratejisini kullanan çok alanlı bir modelleme yöntemi sunulmaktadır. Üçüncüsü, Dİ'in kullanım stratejisi, arıza teşhisi ve tahmini incelenmiştir. Önerinin doğrulanması için yukarıdaki yöntem ve stratejiye dayalı bir vaka çalışması araştırılmıştır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda, Dİ üzerine yapılan bilimsel tartışma büyük ilgi görmektedir. Liu ve diğerleri (2021) Dİ konusunda büyük bir artış olduğunu, bu durumun Google'da 90.200'den fazla aramaya ve Google Scholar, WOS ve Scopus'ta 3000'den fazla akademik arama sonucuna yol açtığını göstermiştir. 2017 yılından önce yayın sayısı oldukça düşüktü. 2018'den sonra akademik dünyada hızlı bir ilerleme kaydedilmeye başlandı. Makalelerin yanı sıra, Dİ üzerine sekiz derleme yayın da yayımlanmıştır [35-39].

Dİ kavramının karmaşıklığından dolayı, literatürde çeşitli tanımlar bulunmaktadır [40-43]. Bu akademik ilerlemelere rağmen, erken çalışmalar neredeyse sadece kavramı tanımlamaya, çerçeve ve paradigmaları oluşturmaya ve endüstride entegrasyon seviyelerini belirlemeye odaklanmıştır. Semeraro ve diğerleri (2021) çalışmayı içeriklerine göre beş gruba ayırarak bu çalışmalarını sınıflandırmıştır:

- 1) Uygulama- Bir Dİ ne zaman kullanılmalıdır? [40, 45-46]
- 2) Yaşam döngüsü- Bir Dİ ne zaman oluşturulmalıdır? [47],
- 3) Fonksiyonlar- Bir Dİ'in faydaları nelerdir? [48-49]
- 4) Mimarlık- Bir Dİ nasıl oluşturulur? [49-50],
- 5) Bileşenler/Teknolojiler- Bir Dİ nasıl uygulanır? [36,51].

Dİ ile ilgili makaleler araştırma odaklarına göre düzenlendiğinde, havacılık [38], [52] otomotiv [53-55], enerji [56-57] imalat [36,51,58,59] ve

sağlık [60-61] gibi başlıklarla karşılaşılmaktadır.

Dİ'in geliştirilmesi ve uygulanmasında, bazı kritik teknolojiler ve aynı zamanda bu teknolojilerin entegrasyonu gereklidir. Bu teknolojiler altı kategoride toplanabilir:

- 1) Simülasyon yöntemleri: Simülasyon modeli, bir Dİ'in oluşturulması ve çalıştırılması için temel teknolojidir, ancak Dİ yaklaşımı ile geleneksel simülasyon yaklaşımları arasındaki temel fark, gerçek zamanlı sanal-fiziksel entegrasyondur [38 ,62-63].
- 2) Fiziksel sistem modelleme [64-65].
- 3) Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT): IIoT, dinamik ve sanal fiziksel bir sistem oluşturmak için birçok farklı sensörden oluşan bir verici olup, gerçek bir fiziksel ve sanal model oluşturmak için veri akışlarını Dİ'e sağlar [66-68].
- 4) Büyük Veri analitiği: Veri akışlarının artan kullanılabilirliği ve geçmiş verilerin genişlemesiyle birlikte, veri analitiği giderek daha önemli hale gelmektedir [69-70].
- 5) Yapay Zeka (YZ): Yapay zeka algoritmalarının Dİ modelleriyle entegrasyonu, Dİ'in uygulama alanını genişletmesi beklenmektedir. Derin öğrenme, yapay zeka alanındaki en heyecan verici gelişmelerden biridir [53,71-73].
- 6) Görselleştirme teknikleri: Son araştırmalar, tasarım verimliliğini artırmak için Dİ sistemini sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR) veya karma gerçeklik (MR) teknolojilerini kullanarak geliştirmeye odaklanmıştır [74-75].

Hareket süresi tahminleri üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, interpolasyon yaklaşımı kullanılarak tahminlerin yapıldığı görülmektedir [76-77]. Bu çalışma, tahmin değerlerini hesaplamasında makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak önceki çalışmalardan farklılık göstermektedir. Öte yandan, hareket hızı ile zaman arasındaki ilişkinin tahmini için farklı yapay sinir ağı teknikleri oluşturulmuş olsalar da, genellikle tek bir gizli katmana sahip mimariler kullanılmıştır [78-79]. Çalışmamızın

temel katkısı, komut tamamlama süresinin tahmininde birçok makine öğrenmesi algoritması kullanılmış ve performanslarının karşılaştırılmış olmasıdır. Öte yandan Dİ'i araştıran bilim insanlarının ve uygulayıcıların sayısı zamanla büyük ölçüde artmasına rağmen ve Dİ üzerine birçok makale imalat ortamından örnekler sunmasına rağmen [80-81], üretim planlama yeteneğini açısından Dİ'in nasıl kullanılabileceğini anlamak adına yeterli sayıda çalışma henüz yoktur. Kapsamlı bir literatür taramasından sonra, bu çalışmada önerilen model, işleme süresi tahmini ile planlama süreci için de ayrıca veriler sağlamayı hedeflemektedir.

4. TEORİK ARKAPLAN

Dİ, canlı veya cansız bir fiziksel varlığın dijital kopyasıdır. Fiziksel ve sanal dünyaları [82] birbirine bağlamaktadır. Bu alanlar arasında sorunsuz bir veri aktarımı sağlar. Bu sayede sanal varlıkların fiziksel varlıklarla aynı anda bulunmasına izin verir. Dİ teknolojisi, ürün yaşam döngüsünün farklı mertebelerinde yer almakta ve her mertebede birbirinden farklı unsurlar tanıtılmaktadır. Bu sebeple Dİ'in ayrı performans biçimleri vardır. Dİ uygulamasını üç farklı açıdan tanımlamak mümkündür. Bunlar 1) ürün tasarımı, 2) imalat ve 3) ürün servisidir.

Ürün tasarımındaki Dİ uygulamasına dijital tasarım ve dijital simülasyon da dahildir. Dijital tasarım, modelleme araçları, fiziksel parametrelerini görsel olarak ifade etmek için ürünlerin sanal modellerini oluşturmakta kullanılır. Dİ güdümlü ürün tasarım yöntemi, araştırmacıların ürünleri tasarlarken tasarım kusurlarını hızla bulmasını ve tasarım verimliliğini artırmasını sağlar.

Dijital simülasyonda uyum kabiliyeti, ürün performansını doğrulamak için bir dizi simülasyon deneyi yoluyla tasarım aşamasında doğrulanabilir. Yerleşik esnek Dİ'i kullanmak, tasarımcıların farklı tasarımları hızla değerlendirmesine ve tasarım kusurlarını bulmasına yardımcı olur.

Üretimdeki Dİ uygulaması, kesin üretim kontrolü elde etmek için ürün işleme ve montaja

uygulanan katı bir model oluşturmak için Dİ'i sanal simülasyon modeline dayanır. Bu konu, üretim süreci simülasyonunu, dijital üretim hattını ve ekipman durumu izlemeyi içerir.

Üretim süreci simülasyonu, ürün üretiminden önce, üretim sürecini sanal üretim aracılığıyla simüle edilebilir. Üretkenlik ve verimlilik kapsamlı bir şekilde analiz edilebilir.

Dijital üretim hattı, üretim aşamasının tüm unsurları, otomatikleştirilmiş bir üretim süreci elde etmek için dijital yöntemlerle yakından koordine edilmiş bir üretim sürecine entegre edilmiştir. Ekipman durum izleme, üretim ekipmanının gerçek zamanlı çalışma verileri toplanarak üretim süreci görsel olarak izlenebilir. Anormal ekipman, üretim sürecini optimize etmek için zamanında ele alınmalı ve ayarlanmalıdır.

Dİ ile birden fazla mühendislik disiplininin gereksinimleri entegre edilir ve tüm yaşam döngüsü boyunca gerçek zamanlı haritalama verilerine dayalı olarak sistem düzeyinde simülasyon ile kendi kendine karar verebilir. Endüstride Dİ'in uygulanabileceği araçlardan biri de CNC tezgâhlarıdır. Endüstrinin ana makinesi olan CNC takım tezgâhı, akıllı imalatla önemli bir ekipmandır. Akıllı üretim modunda, karmaşık işleme görevini ve özelleştirilmiş üretim gereksinimlerini yerine getirmek için bazı niteliklere sahip olmalıdır. Bu nitelikler; 1) hassas simülasyon, 2) kendini algılama, 3) kendinden ayarlama, 4) kendini tahmin etme, 5) öz değerlendirme şeklinde ifade edilebilir.

Hassas simülasyon ile CNC takım tezgâhında (CNCMT) tasarım parametresi ve fiili çalışma koşulları farklıdır. CNCMT modelinin simülasyonu, fiziksel ekipmandan toplanan veri ve bilgileri dikkate alınmalıdır. Hassas simülasyon, çok alanlı modelleme ve simülasyonu CNCMT'den alınan doğru ve güvenilir verilerle entegre edecektir.

Kendini algılama, CNCMT için bir siber fiziksel sistem geliştirmenin ilk adımıdır. Kendi kendine algılama, CNCMT ve bileşenlerinden doğru ve güvenilir veriler elde edebilir ve ardından verilerden anlamlı bilgiler çıkarılabilir.

Kendinden ayarlama yeteneğine sahip CNCMT, üretim görevine göre daha az zaman, daha az fire ve daha iyi kalite için kendini ayarlayabilir. Ayrıca, üretimin minimum kullanıcı endişesi yaratmasını sağlamak için kendini ayarlayabilir.

Kendini tahmin etme; CNCMT, düzensiz olarak farklı hatalara neden olabilir, bu da hatalı hassasiyete neden olur ve üretimi etkiler. Kendi kendini tahmin etme yeteneğine sahip CNCMT, arızayı ciddi arızalar oluşmadan önce çevreye ve kendi koşullarına göre zamanında izleyebilir ve tahmin edebilir.

Öz değerlendirme; kendi kendini değerlendirme yeteneğine sahip CNCMT, çalışma durumunu değerlendirebilir, çalışma parametrelerini optimize edebilir ve makine öğrenimine dayalı kararlar verebilir.

CNCMT'yi bahsedilen yetenekleri elde edecek kadar akıllı hale getirmek için CNCMT'nin Dİ (DTMT) üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, birçok alan için birleşik bir Dİ modelleme yöntemi kurulmuş, fiziksel alan ve dijital alan arasında bir haritalama stratejisi tasarlanmıştır. Buna dayalı bir Dİ kullanma stratejisi araştırılmıştır. DTMT, CNCMT'nin gerçek zamanlı dijital kopyasıdır. Dİ, son derece gelişmiş bilgi işlem, yüksek hassasiyetli simülasyon ve hızlı gelişen yapay zekâ teknolojisi ile sağlanır. Ultra yüksek sadakat modeli tarafından yönlendirilen ve doğru verilere dayalı makine öğrenimi, uzmanlık ve alan bilgisi algoritma modeli ile ifade edilebilir. Bu nedenle DTMT, bir uzman gibi hassas simülasyon, kendini algılama, kendini ayarlama, kendini tahmin etme ve kendi kendini değerlendirme yeteneğine sahiptir. CNCMT'nin tasarım, imalat, kullanım, bakım ve geri dönüşüm aşamalarında kullanılabilir. DTMT ile, CNCMT'nin tüm yaşam döngüsünde birleşik bir model kullanılır. Karmaşık işleme görevini yerine getirmek, plansız bakımın kesinti süresini azaltmak, işleme verimliliğini artırmak ve maksimum yeniden kullanım sağlamak amacıyla birleşik ve gerçek zamanlı algılanan veriler ile çalıştırılmaktadır. Bir DTMT oluşturmak için birleşik model, gerçek

zamanlı algılanan veri desteği ve akıllı kullanım stratejisi çok önemlidir [15].

5. MAKİNE ÖĞRENMESİ ALGORİTMALARI

Yapay zekâ (AI), karmaşık problemleri çözmek için yapay bir varlık tarafından sergilenen zekâ olarak tanımlanır ve böyle bir sistemin genellikle bir bilgisayar veya makine olduğu varsayılır [83]. Yapay zekâ, bilgisayar bilimi ve fizyolojinin bir entegrasyonudur. Basit dilde zekâ, dünyadaki hedeflere ulaşma yeteneğinin hesaplamalı kısmıdır. Zekâ, ezberleme ve anlama yaratmayı, kalıpları tanımayı, değişime uyum sağlayarak seçimler yapmayı ve deneyimlerden öğrenmeyi hayal etme yeteneğidir. Yapay zekâ, bilgisayarların insanlar gibi davranmasını sağlamakla ilgilenir. Yapay zekâ, daha çok insan gibi moda olan ve bir insanın aldığından çok daha kısa sürede karmaşık sorunları çözmeye çalışır. Bu nedenle Yapay Zekâ olarak adlandırılır [84]. AI araştırmasının önemli bir amacı, normalde insan zekâsı gerektiren çeşitli görevleri yerine getirmek için makineler tasarlamaktır. Makine öğrenimi yapay zekanın bir alt kümesi olarak kabul edilir. Makine öğrenimi, insan zekâsı ile ilişkili deneysel "öğrenmeyi" sergilerken, aynı zamanda hesaplama algoritmalarının kullanımı yoluyla analizlerini öğrenme ve geliştirme kapasitesine sahiptir. Bu algoritmalar, kalıpları tanımak ve makineyi otonom öneriler veya kararlar vermek üzere eğitmek için etkin bir şekilde "öğrenmek" için büyük veri girdileri ve çıktıları kullanır. Algoritmanın yeterli tekrarı ve modifikasyonundan sonra, makine bir girdi alabilir ve bir çıktı tahmin edebilir [85-86].

Bu çalışmada, farklı karakteristik özelliklere sahip makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmak istenmiştir. Bellek tabanlı sınıflandırıcı olarak K en yakın komşu algoritması ile optimizasyon tabanlı sınıflandırma algoritmalarından DVM seçilmiştir. Yapay sinir ağları modelleri çoklu regresyon tabanlı çalıştığından dolayı doğrusal regresyon yöntemi ile birlikte çalışmaya dahil edilmiştir.

5.1. Destek Vektör Makineleri (DVM)

Destek Vektör Makinesi popüler bir sınıflandırma tekniğidir. Genellikle verileri eğitim ve test setlerine ayırmayı kapsar. Eğitim setindeki her model, bir “hedef değer” ve birkaç “nitelik” içerir. DVM'nin amacı, yalnızca test verisi öznelikleri verilen test verilerinin hedef değerlerini tahmin eden bir model oluşturmaktır. Algoritma, her veri örneğinin gerçek sayıların bir vektörü olarak temsil edilmesini gerektirir. Bu nedenle, kategorik öznelikler varsa, önce sayısal verilere dönüştürülmesi gerekir. DVM uygulamadan önce yapılması gereken bir diğer şey de ölçekleme yapmaktır. Ölçeklemenin ana avantajı, daha küçük sayısal aralıklardaki niteliklere hâkim olan daha büyük sayısal aralıklardaki özneliklerden kaçınmaktır. Diğer bir avantaj, hesaplama sırasında sayısal zorluklardan kaçınmaktır [87]. Şekil 1’ de farklı özellikte iki kümenin çizilen birden fazla vektörler ile nasıl ayrıldığı gösterilmiştir.

Aşağıdakiler dört temel çekirdek fonksiyonlarıdır:

1) Doğrusal:

$$K(x_j, x_j) = x_i^T x_j. \quad (1)$$

2) Polinom:

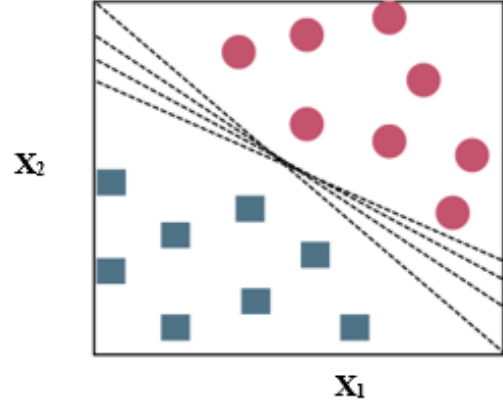
$$K(x_j, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \gamma > 0. \quad (2)$$

3) Radyal Tabanlı Fonksiyon:

$$K(x_j, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0. \quad (3)$$

4) Sigmoid:

$$K(x_j, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + r). \quad (4)$$



Şekil 1: Destek vektör makinesi şekilsel gösterimi.

5.2. K-en Yakın Komşu (KNN)

K-En Yakın Komşu, var olan tüm durumları saklayan ve bir benzerlik ölçütüne göre sınıflandıran bir algoritmadır. KNN, istatistiksel tahmin ve örüntü tanımda parametrik olmayan bir yöntem olarak kullanılmıştır [88]. Şekil 2’de farklı gözlem değerlerinin arasında uzaklıklar hesaplanarak diğer bir ifade ile K-en yakın komşu algoritması kullanılarak farklı gözlem değerlerinin nasıl ayrıldığı gösterilmektedir.

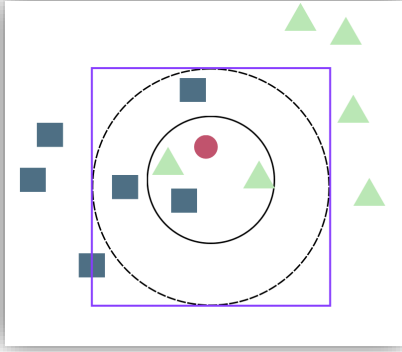
Algoritmada bir olay, komşularının çoğunluk oyu ile sınıflandırılır. Bu olay, bir mesafe fonksiyonu ile ölçülen K en yakın komşusu arasında en geniş kitleye sahip olan sınıfa atanır. $K = 1$ ise, durum basitçe en yakın komşusunun sınıfına atanır. Sürekli değişkenler için kullanılan üç uzaklık vardır: Öklid (5), Manhattan (6), Minkowski (7). Kategorik değişkenlerde Hamming mesafesi (8) kullanılmalıdır.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^k |x_i - y_i| \quad (6)$$

$$(\sum_{i=1}^k (|x_i - y_i|^q))^{1/q} \quad (7)$$

$$D_H = \sum_{i=1}^k |x_i - y_i| \quad (8)$$

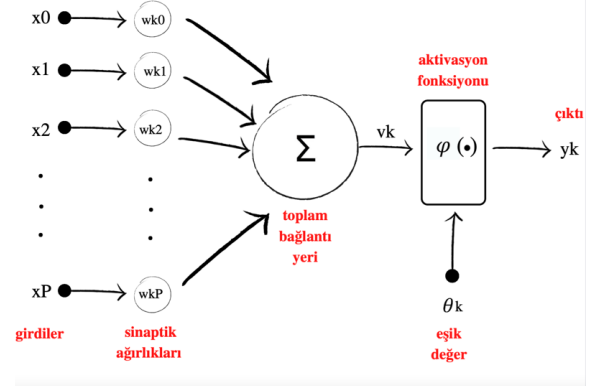


Şekil 2: K-En yakın komşu şekilsel gösterimi.

5.3. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağı (YSA) bilgisayar bilimleri alanlarında yeni bir bilgi işlem teknolojisi olarak kabul edilmiştir. YSA, biyolojik sinir sistemlerinin matematiksel modellerinin genellemeleri olarak geliştirilmiştir. Şekil 3'de biyolojik sinir sistemlerine ait nöron görülmektedir. Bir YSA, her biri muhtemelen (küçük miktarda) yerel belleğe sahip olan çok basit işlemcilerin (nöronlar) koleksiyonlarından oluşan bir ağıdır. Birimler yalnızca kendi yerel verileri üzerinde ve tek yönlü bağlantılar veya bağlantılar aracılığıyla aldıkları girişler üzerinde çalışır [89]. Bir ağ biriminin gelen sinyalleri toplamak ve bir çıkış sinyalini hesaplamak için bir kuralı vardır. Devamında diğer ağ birimlerine gönderilir. Callen'e göre çıktıyı hesaplama kuralları aktivasyon fonksiyonu olarak bilinir [90]. Bir sinir ağının yapısında üç katman vardır. Birinci katman, dış dünyalarla doğrudan etkileşime giren girdi katmanıdır. İkinci katman, sağlanan fonksiyona göre hesaplamaların yapıldığı gizli birimdir. Son katman ise çıktı aldığımız çıktı katmanıdır. Sinir ağlarındaki bilgi, nöronlar arasında sinaptik ağırlıklar olarak depolanır. Ağ, çıktı verileri oluşturulana kadar girdi verilerini katmandan katmana yayar. Eğer ağlar, Geri Yayılım Algoritması ile çok katmanlı algılayıcı ve çıktı istenen çıktıdan farklı ise, bir hata hesaplanır. Sonrasında ağ üzerinden geriye doğru yayılır. Hata yayıldıkça sinaptik ağırlıklar değiştirilir [91]. Genelleştirme, YSA'ları bu kadar güçlü bir araç yapan tek yetenektir.

Uygun bir gösterim kuralı verildiğinde, beklenen yanıtın, v_k 'nin, $v_k = \sum_{j=1}^p w_{kj}x_j$ 'ye göre ortak değişkenlerin $x = (x_0, \dots, x_p)$ değerleriyle ilişkili olduğu bir çoklu doğrusal regresyon modelinin şematik bir temsili vermektedir. Notasyon kuralı, dairenin, içine x_j 'lerin beslendiği ve ilgili w_{kj} 'ler ile çarpıldığı bir hesaplama birimini temsil etmesidir. Şekil 3'de $(w_{k0}, w_{k1}, \dots, w_{kp})$, X_n vektörlerinin girdi vektörlerinin kuvvetlerini belirlemek için ağırlıklardır. Her girdi ağırlık vektörleri ile çarpılır. Nöron y_k 'nin çıktısı, v_k değeri üzerindeki bazı aktivasyon fonksiyonlarının sonucudur.



Şekil 3: Sinir ağının matematiksel modeli.

Genel olarak, sinir ağları (temsil edilen matematiksel modeller), bir bağlantı sistemiyle birbirine bağlanan basit hesaplama birimlerinin bir koleksiyonudur. Birimlerin sayısı çok büyük olabilir ve bağlantılar karmaşık olabilir.

Sinir ağları, örüntü sınıflandırma ve örüntü tanımanın birçok uygulaması için kullanılır: Döviz kurları gibi finansal endekslerin tahmini, radar nokta kaynaklarının konumu, hedef tanıma ve mayın tespiti, uzay aracının yeniden giriş yörüngelerinin tahmini, el yazısı karakterlerin otomatik olarak tanınması, yüzlerin cinsiyetlerinin belirlenmesi, gezgin satıcı problemi gibi optimal yönlendirme problemlerinin çözümü, zaman serilerinin tahmininde düzensizliğin gürültüden ayırtılması [92].

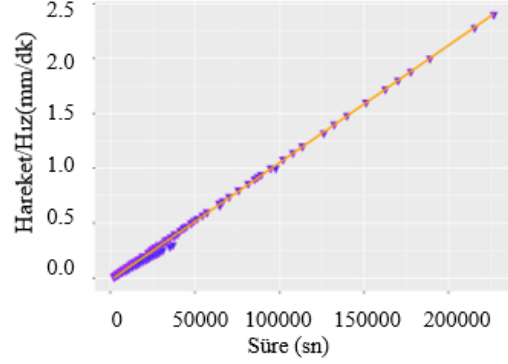
6. VAKA ÇALIŞMASI

6.1. Veri Analizi

Bu çalışmada kalite kontrol yapan bir cihaza ait veri seti ile çalışılmıştır. Bu cihaz kartezyen eksenli kalite kontrol cihazıdır. Bu veri setiyle kalite kontrol cihazına ait operasyon sürelerinin tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Hız faktörünün dinamikliği ile gerçeğe yaklaşılmaya çalışılmış ve olası bütün hız parametreleri denenmiştir. Bu doğrultuda hareket ve hız sütunları, $hız = yol/zaman$ formülü dikkate alınarak tek sütuna düşürülür. Amaç, verilen süreyi hareket/hız ile karşılaştırarak tahminleme yöntemlerini bu veriler üzerinden yürütmektir. Yani yeni veri seti iki sütundan oluşmuş olur. Birinci sütun "süre", ikinci sütun ise "hareket/hız" değerlerinden meydana gelir. Hız parametre değerleri (mm/dakika) 125, 250, 500, 750 ve 1000 ve hareket miktarları değerleri (mm) 10, 15, 25, 35, 50, 65, 75, 85, 100, 115, 125, 135, 150, 165, 175, 185, 200, 215, 225, 235, 250, 285, 300 olarak belirlemiş ve toplamda 115 operasyon süresi ölçülmüştür. Verinin %80'i eğitim verisi olarak ele alınmıştır. Kullanılan veri setinin başlangıç kısmı Çizelge 1 'de verilmiştir. Literatüre katkı sağlaması açısından verinin tamamı da github üzerinden paylaşılmıştır. [93]

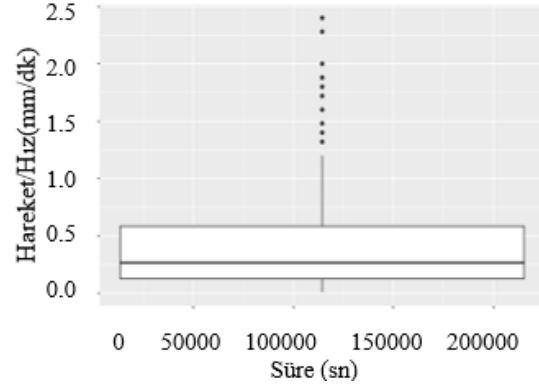
Çizelge 1: Veri setinin ilk on değeri

#	Süre (sn)	Hız (mm/dk)	Hareket (mm)
1	12870.5	1000	100
2	6868.3	1000	50
3	3266.2	1000	20
4	2066	1000	10
5	21302.9	500	100
6	10904.7	500	50
7	4669.4	500	20
8	2592.1	500	10
9	41839.7	250	100
10	21058.7	250	50



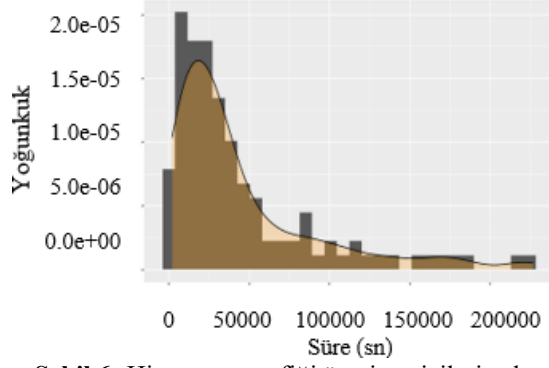
Şekil 4: Düzeltme çizgisi ile beraber dağılım grafiği.

Şekil 4'te dağılım grafiği çizilerek üstüne düzeltme çizgisi eklenmiştir. Sadece noktalarla trendleri görmek zor olabilir. Trendlerin nasıl görüldüğünü görmek için çoğu zaman bir düzeltme çizgisi eklenir. Özellikle gerilemeleri anlamaya çalışırken yardımcı olabilir. Ggplot nesnesinden `geom_smooth, method=lm` kullanılarak çizimi yapılmıştır. Verilerin 0 ile 50000 süre değerleri arasında yoğunlaştığı görülür.



Şekil 5: Kutu grafiği.

Şekil 5 verilerin kutu grafiği verilmiştir. Verilerin 0-0,5 aralığında yığıldığını söylemek mümkündür. Üst ve alt "menteşeler" birinci ve üçüncü çeyreklere karşılık gelir. Kutunun içindeki çizgi ise medyanı temsil eder. Üst tarafta kalan nokta olarak gözükten değerler de aykırı olarak kabul edilir.



Şekil 6: Histogram grafiği üzerine çizilmiş olan yoğunluk grafiği.

Şekil 6'da öncelikle verilerin histogram grafiği çizilmiştir. Bu çizilen grafiğin üzerine yoğunluk grafiği de eklenmiştir. Histogramlar, verileri gruplandırarak ve her bir kutudaki gözlemlerin sayısını sayarak oluşturulur. Amaç genellikle dağılımın şeklini görselleştirmektir. Yoğunluk grafikleri, düzeltilmiş histogramların grafikleri olarak düşünülebilir.

Normalizasyon sonucunda elde edilen verilerle R'da makine öğrenmesi algoritmaları ile tahminlemeler yapılacaktır. Burada asıl amaç, süre (arızaya kalan süre) tahmini yapmaktır. Ayrıca çalışmanın sonucunda elde edilen değerler ile süre (duration) sütun verileri karşılaştırılarak hata hesaplamaları yapılacaktır.

6.2. Komutların İcra Süresinin Tahmini

Bir robot, 3B yazıcının veya CNC tezgahının Di modeli tezgahın gerçek üretim ortamındaki davranışlarını (enerji tüketimi, işlem süresi, arıza durumu v.b.) hesaplamaktadır. Bundan dolayı Dİ modeli üretim süreçlerinin kontrolünde ve optimizasyonunda faydalanılacak bir araçtır. Çalışmada G-Code komutlarının icra sürelerini doğru tahmin edebilen bir model önerilmiştir. Bu model tezgahın çeşitli fonksiyonlarının oluşturduğu etkileri hesaplayacak diğer modellerle birlikte tezgah Dİ'ini oluşturduğunda bütüleşik üretim ve proses planlama, proses optimizasyonu, gerçek zamanlı üretim planlama ve kontrol alanlarında katkı sağlayan bir model ortaya çıkmış olacaktır. Dolayısıyla önerilen süre tahmin 3 boyutlu yazıcıların ve CNC tezgahların Dİ'lerinin tasarımı için referans nitliğinde olacaktır.

Bu çalışmada kalite kontrol yapan bir cihaza ait veri seti kullanılmıştır. Veri odaklı olarak geliştirilen Dİ modelinde icra süresinin tahmini için makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanılmıştır. Modelin tasarımı için kullanılan veri seti doğrusal ve eliptik hareketlerin verilerinden oluşmaktadır. Hareket süresinin ölçümü için harekete başlama ve hareketin bitiş anı akım sensörü ile ölçülen değerlerin bir eşiği geçip geçmemesine bağlı olarak tespit edilmiştir. Makine öğrenmesi modelleriyle de hareket süresi ile G-Code parametreleri arasında korelasyon kurulmuştur.

6.2.1. Doğrusal Regresyon

Regresyon, tek katmanlı varyans analizi ve kovaryans analizi yapmak için kullanılabilir. Formül olarak 'Süre~Hareket/Hız' olarak alınmış veri olarak da normalizasyon sonucundaki verilerden yararlanılmıştır.

Çizelge 2: Regresyon istatistiği.

Parametreler	Değerler
Çoklu R	0,99927871
R Kare	0,99855794
Düzeltilmiş R Kare	0,99854518
Standart Hata	181780209
Gözlemler	115

Çizelge 2'de regresyon istatistik değerleri görülmektedir. R2 değerine bakıldığında 0,99 olduğu görülür. Bu durum modeli %99 başarı ile açıkladığı anlamına gelmektedir. 1 değerine yaklaştıkça daha iyi olan regresyon çizgisi verilere uyar. P değerinin 0.05'ten düşük olması da modelin doğruluğunu gösterir. Regresyon katsayıları yardımıyla tahminlemeler yapılmış ve %8 hata oranına ulaşılmıştır.

6.2.2. Destek Vektör Makineleri (DVM)

DVM bir destek vektör makinesini eğitmek için kullanılır. Yoğunluk tahmininin yanı sıra genel regresyon ve sınıflandırma yapmak için kullanılabilir. İlk parametrede, uygun modelin sembolik bir açıklaması olarak süre sütunu alınır. İkinci parametre olarak da modeldeki değişkenleri içeren isteğe bağlı bir veri çerçevesi, yani test seti kullanılır. Burada normalize edilmiş verilerin %80'i eğitim seti, %20'si test seti olarak alınır. Kernel için 4 farklı yöntem baz alınır. Her biri için de denenerek

tahminlemeler yapılır. Buradaki yöntemler; linear, polynomial, radial basis, sigmoid olarak sıralanmaktadır.

Çizelge 3: DVM matrisi çıktısı.

Genel İstatistik (linear, polynomial, radial)	Değerler
Doğruluk: 0.9565	Doğruluk: 0.6957
95% CI: (0.7805, 0.9989)	95% CI: (0.4708, 0.8679)
Bilgi Oranı Yok: 0.0435	Bilgi Oranı Yok: 0.0435
P-Değeri: < 2.2e-16	P-Değeri: < 2.2e-16
Kappa: 0.9545	Kappa: 0.6818

Çizelge 3’de DVM matrisi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre linear, polynomial ve radial basis fonksiyonları %96 doğrulukla çalışmıştır. Bununla birlikte p-değerlerine bakıldığında 0.05’ten küçük olduğu için tüm fonksiyonların geçerliliği kabul edilir.

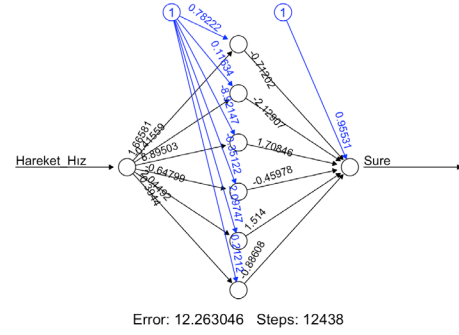
6.2.3. K-en Yakın Komşular (KNN)

KNN, sınıflandırma ve regresyon problemleri için tercih edilen denetimli bir makine öğrenme algoritmasıdır. Verileri sınıflandırmak için hayali bir sınır oluşturur. Tahmin için yeni veri noktaları eklendiğinde, algoritma bu noktayı sınır çizgisinin en yakınına ekler. Bu algoritmada k, kullanıcı tarafından tanımlanan bir sabittir ve en yakın komşuluklar vektörü kullanılarak hesaplanır. 'caret' paketi, regresyon sorunları için KNN'yi uygulamak için 'knnreg' işlevi sağlar. Komşu sayısı 5, 7, 9 şeklinde mimariler oluşturularak tahminlemeler gerçekleştirilmiş ve min hatayı veren komşu sayısı 5 olarak seçilmiştir.

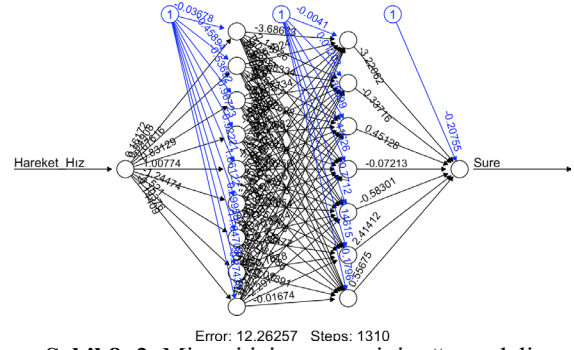
6.2.4. Yapay Sinir Ağları

Normalize edilmiş verilerin %80’i eğitim seti, %20’si test seti olarak alınır. Hidden= c (9, 7), threshold= 0.01, act.fct= “tanh” verilmesiyle minimum hata bulunmuştur (tekli hidden için 6, ikili için (9, 7) şeklindedir). Act.fct için ise “logistic” ve “tanh” seçenekleri mevcuttur. Bunlardan en iyi sonucu da “tanh” fonksiyonu vermiştir. Burada en küçük hatayı bulmaya çalışırken hidden belirlemede önce ikinci değer sabit tutularak birinci değer 1’den 10’a kadar denenmiştir, sonrasında en iyi çıkan birinci değer seçilip sabit tutularak ikinci değer 1’den

10’a kadar denenmiştir. Aynı değerler ile kod tekrardan çalıştırıldığında hata oranları düşük seviyede değişiklik gösterse de minimum hata (9, 7) için elde edilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8’de bu mimarilere ait yapay sinir ağı modelleri bulunmaktadır.



Şekil 7: 1. Mimari için yapay sinir ağı modeli.

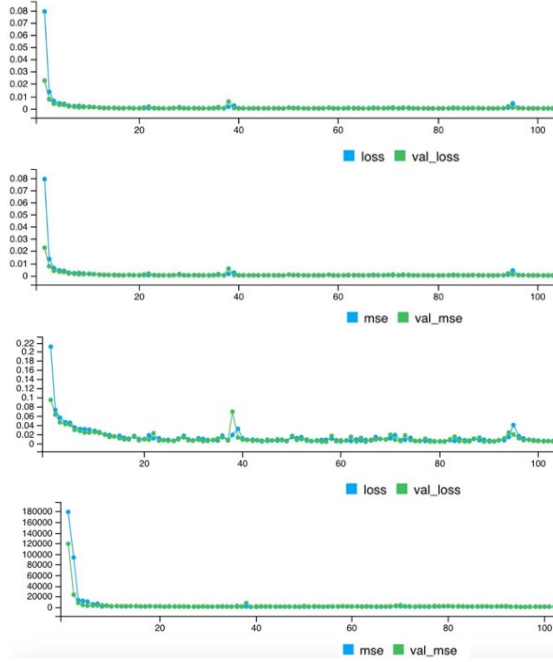


Şekil 8: 2. Mimari için yapay sinir ağı modeli.

Yukarıda verilen mimarilerle birlikte R programı üzerinden yapay sinir ağlarıyla farklı kombinasyonlar deneyerek olabilecek en iyi mimari bulunmaya çalışılmıştır. Burada Tensorflow ve Keras kütüphanelerinden yararlanılmıştır. R’deki yapay sinir ağlarının yanında Python’la bağlantı kurarak Keras’i direkt kullanmak denenmiştir. Yinelemeli yerel arama algoritması ile en iyi mimariyi elde etmeye çalışarak bu kodun parametreleri oluşturulmuştur. Bu mimari Çizelge 3’de görülmektedir.

Çizelge 4: Olası optimum yapay sinir ağı mimarisi.

	Düğüm Sayısı	Aktivasyon Fonksiyonu
Girdi Sayısı	3	
Katman 1	30	'Relu'
Katman 2	80	'Relu'
Katman 3	40	'Relu'
Katman 4	30	'Relu'
Çıktı Sayısı	1	"Softplus"

**Şekil 9:** Yapay sinir ağları için hata ölçümleri grafiği.**Çizelge 5:** Hata oranlarına göre performans çizelgesi.

Yöntemler	MSE	MAE	R ²	Doğruluk
Regresyon	1.32E-36	0,0161802	0.985579	0.91722299
DVM-Linear	0.00603773	0.06689249	0.995651	0.853849
DVM-Radyal	0.07171921	0.1321959	0.9483404	0.8104526
DVM-Polinom	0.4670129	0.471527	0.6636087	0.2650645
DVM-Sigmoid	1.887.448	0.8229177	0.3595363	0.0252
YSA 1. Mimari	0.2917583	0.1407296	0.654525	0.8823262
YSA 2. Mimari	0.2916694	0.1360941	0.6545329	0.8827776
YSA 3. Mimari	0.00015435	0.008385	0.995745	0.991615
KNN 1.Mimari	0.0199952	0.05727025	0.1414044	0.93481055
KNN 2.Mimari	0.03570575	0.06796121	0.1889597	0.93612222
KNN 3.Mimari	0.0598606	0.09467588	0.2446643	0.91496762

7. SONUÇ

Bu çalışmada, dinamik hız ve hareket parametreleri ile çalıştırılan 3 boyutlu yazıcı ve CNC tezgâhları gibi kartezyen eksenli

Şekil 9'da 200 periyot için (epochs) 'adam optimize' ile, 'mse' kayıp fonksiyonu ve 'mse', 'mae', 'mape' metrikleri için 'compile' metodu ile bu şekil çizdirilmiştir. Burada en az dalgalanma 'mse' hesaplanmasında gerçekleşmiştir.

6.3. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Kartezyen eksenli tezgahlarda farklı hız parametreleri kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bu işlemlerin cihaz üzerinde gerçekte ne kadar sürdüğü veri setinde mevcuttur. Örneğin bir işlem 21.321 ms olarak tahmin edilirken cihaz üzerinde yapılan ölçüm sonrasında 21.303 sn gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5'te çalışmada uygulanan makine öğrenmesi algortimalarının ortalama kareli hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), R Kare (R²) ve Doğruluk yöntemleri kullanılarak performansları ölçülmüştür. Z-score normalizasyonu ile normalize edilmiş veri seti ile yapılan tahmin çalışmasında en düşük ortalama mutlak sapmaya sahip olan YSA 3. mimari MSE ve MAE açısından da en iyi performansı sergilemiştir. Bundan dolayı hata miktarı en düşük model YSA 3. mimari olarak değerlendirilmiştir. Diğer taraftan R² ve doğruluk değerlerine bakıldığında YSA 3. Mimarinin diğer methotlara oranla en yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.

tezgahların işlem sürelerinin çalışma parametrelerine bağlı olarak tahmini için bir model önerilmiştir. Önerilen model üretim planlama açısından kaba kapasite planlama ile

çizelgelemede ve ürün tasarımı aşamasında da maliyet kestiriminde katkı sağlayacaktır. Modelin ön görülen katkıyı sağlayabilmesi için üretim sisteminde kullanılan tezgahlara adapte olması kaçınılmaz bir zorunluluk olduğundan zaman tahmin işleminde makine öğrenmesi modelleri değerlendirilmiştir. Endüstriyel CNC üreticisi DMG MORI'nin Dİ'leri iteratif optimizasyonda, üretim planlama ve kontrolde ve performans öngörülerinde kullandığını açıklaması bu durumu desteklemektedir.[94] Makinelere entegre edilen Dİ üretim sürecinin sanal ortamda detaylı bir simülasyonunun yapılmasını ve optimize edilmesini mümkün hale getirmektedirler.

Dİ oluşturan makine öğrenmesi modellerinin oluşturulma aşamasında kullanılan veriler kalite kontrol yapan kartezyen eksenli bir cihazdan alınmıştır. Örnek veri seti üzerinde veriler ön işlemeden geçirilmiş ve sonrasında işlem sürelerini tahmin etmek için makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Hata miktarları en düşük olan modeller YSA 3. mimari, doğrusal regresyon, k-en yakın komşu modelleri ve doğrusal DVM modelidir. Buradan, kartezyen eksenli (doğrusal veya eliptik) hareketlerin doğrusal yöntemlerle iyi modellenebildiği görülmektedir. Fakat en iyi yöntem olarak hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilen YSA modeli en iyi model olarak seçilmiştir. Bunun nedeni 0.00015435 MAE ve 0.008385 MSE değeri ile hata oranları açısından en düşük olan yöntemidir. Diğer yandan $995745 R^2$ değeri ve 0.991615 doğruluk oranıyla de diğer modellerden daha yüksek değerlere sahiptir. Ayrıca lineer yöntemlerin daha başarılı olması varyansın 'da düşük olduğu konusunda fikir vermektedir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında birçok makine öğrenmesi algoritmasını çalıştırabilen ve bu algoritmalara ait parametreleri optimize ederek yöntemlerin performanslarını en iyilemeye çalışan AutoML ve hiper-parametre optimizasyonları yapılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Zhang D, "Powering E-Learning In The New Millenium: An Overview of E-Learning and

Enabling Technology, Information System Frontiers," Vol. 5, Issue 2, Page 201–212, 2004.

2. [A. Y. C. Nee, S. K. Ong, G. Chryssolouris, and D. Mourtzis, "Augmented reality applications in design and manufacturing," CIRP Ann Manuf Technol, Vol. 61, Issue 2, Page 657–679, 2012

3. D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov, F. Werner, and M. Ivanova, "A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0," Int J Prod Res, Vol. 54, Issue 2, Page 386–402, 2016

4. J. E. Brough, M. Schwartz, S. K. Gupta, D. K. Anand, R. Kavetsky, and R. Pettersen, "Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operations," Virtual Real, Vol. 11, Issue 4, Page 189–206, 2007

5. Blaga and L. Tamas, "Augmented Reality for Digital Manufacturing," MED 2018 - 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, Page 173–178, 2018

6. N. Syam and A. Sharma, "Waiting for a sales renaissance in the fourth industrial revolution: Machine learning and artificial intelligence in sales research and practice," Industrial Marketing Management, Vol. 69, Issue December 2017, Page 135–146, 2018

7. Ramos, J. C. Augusto, and D. Shapiro, "Ambient intelligencethe next step for artificial intelligence," IEEE Intell Syst, Vol. 23, Page 15–18, 2008

8. Duncan, M. Whittington, and V. Chang, "Enterprise security and privacy: Why adding IoT and big data makes it so much more difficult," Proceedings of 2017 International Conference on Engineering and Technology, ICET 2017, Vol. 2018-Janua, Page 1–7, 2017

9. P. Aivaliotis, K. Georgoulis, and K. Alexopoulos, "Using digital twin for maintenance applications in manufacturing: State of the Art and Gap analysis," Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC 2019, 2019

10. Altamiranda and E. Colina, "A system of systems digital twin to support life time management and life extension of subsea production systems," OCEANS 2019 - Marseille, OCEANS Marseille 2019, Vol. 2019-June, Page 1–9, 2019

11. Murphy et al., “Representing financial data streams in digital simulations to support data flow design for a future Digital Twin,” *Robot Comput Integr Manuf*, Vol. 61, 2018
12. P. Aivaliotis, K. Georgoulas, and G. Chryssolouris, “The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing,” *Int J Comput Integr Manuf*, Vol. 32, Page 1067–1080, 2019
13. W. Luo, T. Hu, Y. Ye, C. Zhang, and Y. Wei, “A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin,” *Robot Comput Integr Manuf*, Vol. 65, Page 101974, 2020
14. P. Hehenberger and D. Bradley, “Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers,” *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and Their Designers*, Page 1–259, 2016
15. M. Grieves, “Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - A Whitepaper by Dr . Michael Grieves,” *White Paper*, Issue March, Page 1–7, 2014.
16. K. A. Hribernik, L. Rabe, K. D. Thoben, and J. Schumacher, “The product avatar as a product-instance-centric information management concept,” *Int J Prod Lifecycle Manag*, Vol. 1, Page 367–379, 2006
17. J. Ríos, J. C. Hernández, M. Oliva, and F. Mas, “Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft,” *Advances in Transdisciplinary Engineering*, Vol. 2, Page 657–666, 2015
18. T. Wuest, K. Hribernik, and K. D. Thoben, “Assessing servitisation potential of PLM data by applying the product avatar concept,” *Production Planning and Control*, Vol. 26, Page 1198–1218, 2015
19. K. Hribernik, T. Wuest, and K. D. Thoben, “Towards product avatars representing middle-of-life information for improving design, development and manufacturing processes,” *IFIP Adv Inf Commun Technol*, Vol. 411, Page 85–96, 2013
20. M. Shafto et al., “Modeling , Simulation , Information Technology & Processing Roadmap-NASA,” *National Aeronautics and Space Administration*, Page 1–38, 2012.
21. Bilberg and A. A. Malik, “Digital twin driven human–robot collaborative assembly,” *CIRP Annals*, Vol. 68, Page 499–502, 2019
22. S. Meng, S. Tang, Y. Zhu, and C. Chen, “Digital Twin-Driven Control Method for Robotic Automatic Assembly System,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, Vol. 493, 2019
23. Q. Liu, H. Zhang, J. Leng, and X. Chen, “Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system,” *Int J Prod Res*, Vol. 57, Page 3903–3919, 2019
24. Botkina, M. Hedlind, B. Olsson, J. Henser, and T. Lundholm, “Digital Twin of a Cutting Tool,” *Procedia CIRP*, Vol. 72, Page 215–218, 2018
25. D. Process, M. Supported, and W. Artificial, “Yapay zeka destekli bir tasarim işlem modelinin yapisi,” *Cilt 1*, Sayfa 1–8, 2017.
26. O. SEVLİ, “3 Boyutlu Baskıda Kullanılacak Malzemenin Makine Öğrenmesi Teknikleri İhtisatılması,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Cilt 5, Sayı 3, Sayfa 596–605, 2021
27. D. ALTUNKAYNAK, B. DUMAN, and K. ÇERİNKAYA, “5 Eksen 3B Yazıcı Tasarımı Ve Uygulaması,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Cilt 4, Sayı 2, Sayfa 124–138, 2020
28. P. Wang, K. Erkorkmaz, J. McPhee, and S. Engin, “In-process digital twin estimation for high-performance machine tools with coupled multibody dynamics,” *CIRP Annals*, Vol. 69, issue. 1, Page 321–324, 2020
29. K. Liu, L. Song, W. Han, Y. Cui, and Y. Wang, “Time-Varying Error Prediction and Compensation for Movement Axis of CNC Machine Tool Based on Digital Twin,” *IEEE Trans Industr Inform*, Vol. 18, issue. 1, Page 109–118, 2022
30. Y. G. Kabaldin, P. V. Kolchin, D. A. Shatagin, M. S. Anosov, and A. A. Chursin, “Digital Twin for 3D Printing on CNC Machines,” *Russian Engineering Research*, Vol. 39, issue. 10, Page 848–851, Oct. 2019
31. S. Paripooran, R. Abishek, D. C. Vivek, and S. Karthik, “An Implementation of AR Enabled Digital Twins for 3-D Printing,” *Proceedings - 2020 6th*

IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems, iSES 2020, Page 155–160, 2020

32. Y. Zhang, L. Mu, G. Shen, Y. Yu, and C. Han, “Fault diagnosis strategy of CNC machine tools based on cascading failure,” *J Intell Manuf*, Vol. 30, issue. 5, Page 2193–2202, 2019

33. Villalonga, G. Beruvides, F. Castaño, R. E. Haber, and M. Novo, “Condition-based Monitoring Architecture for CNC Machine Tools based on Global Knowledge,” *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, issue. 11, Page 200–204, 2018

34. W. Luo, T. Hu, C. Zhang, and Y. Wei, “Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, Vol. 10, issue. 3, Page 1129–1140, 2019

35. M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, “15 Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,” *J Manuf Syst*, Vol. 58, Page 346–361, 2021

36. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, “2 Review of digital twin applications in manufacturing,” *Comput Ind*, Vol. 113, 2019

37. J. Wu, Y. Yang, X. U. N. Cheng, H. Zuo, and Z. Cheng, “3 The Development of Digital Twin Technology Review,” in *Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, CAC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, Page 4901–4906

38. R. K. Phanden, P. Sharma, and A. Dubey, “6 A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, Page 174–178

39. M. Holler, F. Uebernickel, and W. Brenner, “Digital Twin Concepts in Manufacturing Industries- A Literature Review and Avenues for further Research,” *18th International Conference on Industrial Engineering (IJIE)*, Issue 2002, 2016.

40. M. Shafto, M. Conroy, R. Doyle, and E. Glaessgen, “DRAFT Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap,” *Technology Area*, 2010.

41. M. Madni, C. C. Madni, and S. D. Lucero, “Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering,” *Systems*, Vol. 7, issue. 1, 2019

42. Q. Liu, B. Liu, G. Wang, and C. Zhang, “A comparative study on digital twin models,” in *AIP 43. Conference Proceedings*, 2019.

44. J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. Chen, “13 Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 60. Elsevier B.V., Page 119–137, 2021.

45. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, “14 Digital twin paradigm: A systematic literature review,” *Comput Ind*, Vol. 130, 2021

46. M. Grieves, “Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication,” *White Paper*, issue. March, 2014.

47. R. Zhang, F. Gu, H. Mansaf, T. Wang, and A. D. Ball, “Gear wear monitoring by modulation signal bispectrum based on motor current signal analysis,” *Mech Syst Signal Process*, Vol. 94, Page 202–213

48. M. W. Grieves, “Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises,” *International Journal of Product Development*, Vol. 2, issue. 1–2, 2005

49. S. Haag and R. Anderl, “Digital twin – Proof of concept,” *Manuf Lett*, Vol. 15, 2018

50. K. T. Park et al., “Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory,” *Int J Comput Integr Manuf*, Vol. 32, Issue 6, 2019

51. Q. Qi, F. Tao, Y. Zuo, and D. Zhao, “Digital Twin Service towards Smart Manufacturing,” in *Procedia CIRP*, 2018

52. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, B. Song, and A. Tiwari, “Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Taylor and Francis Ltd., 2022

53. M. Mazzoleni, M. Scandella, F. Previdi, and G. Pispoli, “Data on the first endurance activity of a Brushless DC motor for aerospace applications,” *Data Brief*, Vol. 29, Apr. 2020

54. Theissler, J. Pérez-Velázquez, M. Kettelgerdes, and G. Elger, “Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry,” *Reliab Eng Syst Saf*, Vol. 215, 2021

55. Y. H. Son, K. T. Park, D. Lee, S. W. Jeon, and S. do Noh, "Digital twin-based cyber-physical system for automotive body production lines," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 115, issue. 1–2, 2021
56. Biesinger and M. Weyrich, "The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry," in 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology, ICMT 2019, 2019
57. M. Lamagna, D. Groppi, M. M. Nezhad, and G. Piras, "A COMPREHENSIVE REVIEW ON DIGITAL TWINS for SMART ENERGY MANAGEMENT SYSTEM," *International Journal of Energy Production and Management*, Vol. 6, issue. 4, 2021
58. E. Onile, R. Machlev, E. Petlenkov, Y. Levron, and J. Belikov, "Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review," *Energy Reports*, Vol. 7, 2021
59. L. Lattanzi, R. Raffaelli, M. Peruzzini, and M. Pellicciari, "12 Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation," *Int J Comput Integr Manuf*, Vol. 34, issue. 6, Page 567–597, 2021
60. L. Li, B. Lei, and C. Mao, "Digital twin in smart manufacturing," *J Ind Inf Integr*, Vol. 26, 2022
61. O. S. Kobayakova, V. I. Starodubov, N. G. Kurakova, and L. A. Tsvetkova, "Digital twins in healthcare: An assessment of technological and practical prospects," *Vestn Ross Akad Med Nauk*, Vol. 76, issue. 5, 2021
62. K. Bruynseels, F. S. de Sio, and J. van den Hoven, "Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm," *Front Genet*, Vol. 9, issue. FEB, 2018
63. L. Pan, X. Guo, Y. Luan, and H. Wang, "Design and realization of cutting simulation function of digital twin system of CNC machine tool," in *Procedia Computer Science*, 2021
64. H. dos Santos, J. A. B. Montevechi, J. A. de Queiroz, R. de Carvalho Miranda, and F. Leal, "11 Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review," *International Journal of Production Research*. Taylor and Francis Ltd., 2021
65. Ashtari Talkhestani et al., "An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System," *At-Automatisierungstechnik*, Vol. 67, issue. 9, 2019
66. J. Wilhelm, C. Petzoldt, T. Beinke, and M. Freitag, "16 Review of Digital Twin-based Interaction in Smart Manufacturing: Enabling Cyber-Physical Systems for Human-Machine Interaction," *Int J Comput Integr Manuf*, Vol. 34, issue. 10, Page 1031–1048, 2021
67. J. C. P. Cheng, W. Chen, K. Chen, and Q. Wang, "Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms," *Autom Constr*, Vol. 112, 2020
68. Ashtari Talkhestani et al., "An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System," *At-Automatisierungstechnik*, Vol. 67, issue. 9, 2019
69. S. Ayvaz and K. Alpay, "Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time," *Expert Syst Appl*, Vol. 173, 2021
70. Singh, "Big data, industry 4.0 and cyber-physical systems integration: A smart industry context," in *Materials Today: Proceedings*, 2021
71. M. M. Rathore, S. A. Shah, D. Shukla, E. Bentafat, and S. Bakiras, "The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities," *IEEE Access*, Vol. 9, 2021
72. W. J. Lee, H. Wu, H. Yun, H. Kim, M. B. G. Jun, and J. W. Sutherland, "Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, Page 506–511
73. Kammerer, M. Gaust, M. Küstner, P. Starke, R. Radtke, and A. Jesser, "Motor Classification with Machine Learning Methods for Predictive Maintenance," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 54, issue. 1, Page 1059–1064, 2021
74. Gohel, H. Upadhyay, L. Lagos, K. Cooper, and A. Sanzetenea, "Predictive maintenance architecture development for nuclear infrastructure using machine learning," *Nuclear Engineering and*

Technology, Vol. 52, issue. 7, Page 1436–1442, Jul. 2020

75. Q. Zhang, Z. Yang, J. Duan, Z. Liu, and J. Qin, “Three-dimensional visualization interactive system for digital twin workshop,” *Journal of Southeast University (English Edition)*, Vol. 37, issue. 2, 2021

76. Z. Han, Y. Li, M. Yang, Q. Yuan, L. Ba, and E. Xu, “Digital twin-driven 3D visualization monitoring and traceability system for general parts in continuous casting machine,” *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, Vol. 14, issue. 7, 2020

77. Shi, Q. Bi, and Y. Wang, “Five-axis interpolation of continuous short linear trajectories for 3[PP]S-XY hybrid mechanism by dual Bezier blending,” *J Shanghai Jiaotong Univ Sci*, Vol. 21, issue. 1, Page 90–102, 2016

78. N. Saikumar, N. S. Dinesh, and P. Kammardi, “Experience mapping based prediction controller for the smooth trajectory tracking of DC motors,” *Int J Dyn Control*, Vol. 5, issue. 3, Page 704–720, 2017

79. M. Endo and B. Sencer, “Accurate prediction of machining cycle times by data-driven modelling of NC system’s interpolation dynamics,” *CIRP Annals*, Vol. 71, issue. 1, Page 405–408, 2022

80. T. Gurgenc, F. Ucar, D. Korkmaz, C. Ozel, and Y. Ortac, “A study on the extreme learning machine based prediction of machining times of the cycloidal gears in CNC milling machines,” *Production Engineering*, Vol. 13, issue. 6, Page 635–647, 2019

81. P. Aivaliotis, K. Georgoulas, and G. Chryssolouris, “The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing,” *Int J Comput Integr Manuf*, Vol. 32, issue. 11, 2019

82. H. A. Weiss, N. Leuning, K. Hameyer, H. Hoffmann, and W. Volk, “Manufacturing efficient electrical motors with a predictive maintenance approach,” *CIRP Annals*, Vol. 68, issue. 1, Page 253–256

83. El Saddik, “Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies,” *IEEE Multimedia*, Vol. 25, issue. 2, Page 87–92, 2018

84. G. F. Luger, *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Vol. 5th. 2005.

85. G. K. Jha, “Artificial Neural Networks - Architectures and Applications,” *Artificial Neural Networks - Architectures and Applications*, 2013

86. S. A. Bini, “Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, and Cognitive Computing: What Do These Terms Mean and How Will They Impact Health Care?,” *Journal of Arthroplasty*, Vol. 33, issue. 8, Page 2358–2361, 2018

87. D. Naylor, “On the prospects for a (Deep) learning health care system,” *JAMA - Journal of the American Medical Association*, Vol. 320, issue. 11, Page 1099–1100, 2018

88. C.-W. Hsu, C.-C. Chang, and C.-J. Lin, “Propofol and sevoflurane during epidural/general anesthesia: Comparison of early recovery characteristics and pain relief,” *Middle East Journal of Anesthesiology*, Vol. 17, issue. 5, Page 819–832, 2004.

89. R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, “Pattern classification,” *Handbook of Neural Computation*, 2004

90. Abraham, “Artificial neural networks,” *Artificial Neural Networks*, Page 1–426, 2011

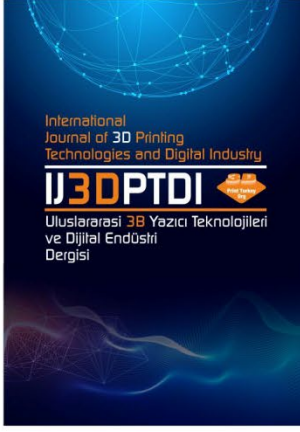
91. Z. Zhou, “Rule Extraction: Using Neural Networks or for Neural Networks?,” issue. 2, Page 249–253, 2004.

92. F. Nielsen, “Recurrent Neural Networks algorithms and applications,” *Proceedings - 2021 2nd International Conference on Big Data and Artificial Intelligence and Software Engineering, ICBASE 2021*, Page 38–43, 2021

93. Cheng and D. M. Titterington, “[Neural Networks: A Review from Statistical Perspective]: Rejoinder,” *Statistical Science*, Vol. 9, issue. 1, Page 2–30, 2007

94. Cesur Muhammet Raşit and Cesur Elif, “Alcybe CNC Digital Twin” <https://github.com/rasitcesur/Alcybe/tree/DigitalTwin/Models/Workbench/DataSets>.

95. DMG MORI, “What is the Digital Twin?,” 2023. <https://dk.dmgmori.com/news-and-media/blog-and-stories/blog/what-is-the-digital-twin> (accessed Aug. 16, 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>

SYSTEM IDENTIFICATION AND VIBRATION ANALYSIS OF ROTATING BEAM WITH LATTICE STRUCTURES

Yazarlar (Authors): Serkan Çaşka^{ID}, Muhammed Enes Dokuz^{ID*}, Mustafa Aydın^{ID},
Mehmet Mert İlman^{ID}, Sahin Yavuz^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çaşka S.,
Dokuz M. E., Aydın M, İlman M. M., Yavuz Ş., “System Identification and Vibration
Analysis of Rotating Beam With Lattice Structures” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*,
7(2): 322-327, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1325131

Araştırma Makale/ Research Article

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

SYSTEM IDENTIFICATION AND VIBRATION ANALYSIS OF ROTATING BEAM WITH LATTICE STRUCTURES

Serkan Çaşka^a, Muhammed Enes Dokuz^{a*}, Mustafa Aydın^a, Mehmet Mert İlman^a, Şahin Yavuz^b

^aManisa Celal Bayar University, Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, TURKEY

^bDokuz Eylul University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, TURKEY

* Corresponding Author: muhammed.dokuz@cbu.edu.tr

(Received: 10.07.23; Revised: 26.07.23; Accepted: 15.08.23)

ABSTRACT

Today, lattice-structured materials are used in many engineering applications. Research and applications including lattice structures focused on obtaining lightweight components with the optimal distribution. In literature, studies on obtaining vibration models of the beams with lattice structures are limited. In this study, vibration models of rotating beams with lattice structure were obtained by using system identification methods. Beams used in the experimental phase of this study were produced using FDM 3D printer. Three types of lattice structure such as triangular, hexagonal, and square rotated were used. Lattice-based generative design program nTopology was used for the design of the beams. The experiments were carried out using a setup that includes a servo system and a wireless accelerometer. It was proved that the obtained models successfully represent the vibration behavior of the rotating beams. The success of the vibration models of the rotating beams was compared and discussed using tables and figures.

Keywords: Rotating Beam, System Identification, Vibration Analysis, Lattice Structures, Additive Manufacturing.

1. INTRODUCTION

In recent years, one of the fastest-growing and most popular fields has been flexible and soft manipulators in the robotics field [1-2]. Especially since there is no need for rigidity, it is possible to make designs that are much lighter and have higher load-carrying capacity [3]. Due to these new designs, problems such as dynamic strength and vibration sensitivity come to the fore again. Such that there are many design developments and control systems related to vibration, which is one of the reasons that reduce the efficiency of flexible manipulators. First and foremost, accurate dynamic modeling is required to apply these solutions [4].

The purpose of vibration analysis of mechanical systems is to obtain system behaviors under different dynamic conditions [5]. In the literature, there is an interest in the analysis of the vibration characteristics of rotating flexible beams [6]. Several structural configurations such as helicopter blades, spinning spacecraft, and satellite booms can be counted in this

category [7]. In recent years, there is an increase in the number of paper that includes simulation and experimental-based studies [8].

System identification is a significant process in obtaining mathematical models of dynamic systems. Identifying the system dynamics successfully provides the design of robust systems for prediction, planning, and control [9]. In control system design, one of the most important steps is to obtain an accurate system model. If the dynamic model does not represent the real behavior of the system, the controller cannot provide optimum system output [10].

Lattices can be referred to as periodic cellular structures, metamaterials, or architected materials. Lattice applications focused on obtaining lightweight components with the optimal distribution [11-12]. Additive manufacturing methods have numerous advantages over traditional subtractive manufacturing methods such as machining, and injection molding. In recent years, additively

manufactured or 3D-printed lattice materials have been studied in many research [13]. For instance, in a previous study, the bioactivity and compressive strength of the specimens were examined to observe the bonding and adhesion effects of different lattice structures on bone tissue [14].

In this study, vibration models of rotating beams with lattice structures were obtained by using system identification approaches. In the previous study, the mechanical properties of the parts produced by the FDM method with various additives and various particle sizes were investigated [15]. There has not been a comprehensive study on vibration analysis of parts produced with FDM 3D printing. Three types of beams were used in the experimental phase of this study and were produced by using an FDM type 3D printer. Lattice sizes suitable for the precision of the FDM method were preferred in the design of the parts. PLA material, which is the most commonly used and optimum strength polymer, was used. The success of the obtained vibration models of the rotating beams was compared. The followings are some of the potential novelties that the study could bring to the literature:

- (i) Lighter and more stable manipulators were produced thanks to the lattice designs,
- (ii) manipulator vibration analyses were carried out and the modal analysis results were compared,
- (iii) despite the complex form of the manipulator caused by lattice topology, very accurate models have been derived utilizing system identification methods,
- (iv) these reduced-order models are also appropriate for future control applications as well, by means of their fast-computable structures.

2. MATERIAL AND METHODS

Topology computer-aided design software was used to create three specimens with varying lattice structures. In this study, strut-based triangular, hexagonal, and square lattice structures were preferred for the internal structure of the specimens. The lower and upper shells were assessed to be 2 mm thick. To connect the specimen to the experimental setup, a 30 mm long connection area was designed. The specimen dimensions were 300 mm total length, 25 mm width, and 10 mm thickness. The

specimen was converted to STL file format by meshing with a minimum feature size of 0.6 mm.

The specimens were produced using the FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing process. STL design files were converted to g-code files using the PrusaSlicer software. The printing direction is rotated in relation to the plane with the least gravitational effect on the parts. The specimens were printed using PLA (Polylactic acid) filament with a nozzle diameter of 0.4 mm, a layer height of 0.1 mm, and a fill rate of 100%.

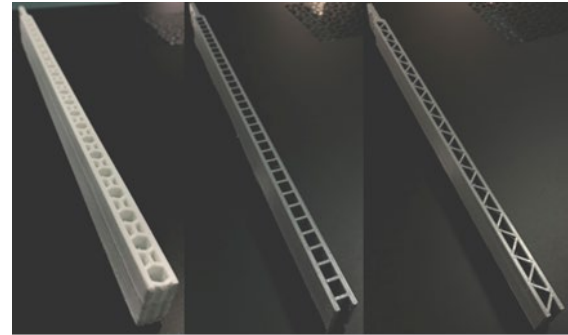


Figure 1. Lattice structured beams, (left) hexagonal form, (middle) square form, (right) triangular form

3. EXPERIMENTAL SETUP

The scheme of the experimental system used for the vibration analysis of lattice-structured beams in the study is given in Figure 2. Also, the properties of the system are given in Table 1, together with data sampling information. Accordingly, first of all, the planar uniaxial flexible manipulator moves in the XY plane (local axes are shown in Figure 2). In addition, since it is known that the manipulator will mostly try to bend under payload, the accelerations in the local Y-axis at the endpoint of the beam are measured to obtain the maximum vibration. For this, a wireless accelerometer sensor (WAS) and a wireless data acquisition system (WDA) are used. The fixed sampling frequency of the signal is set at 650 Hz. Node Commander software is used to save the data. The servo system that gives motion to the system consists of a servo driver with model MR-J2S-20A and a servo motor with model HC-KFS23B (200W), a harmonic drive gearbox with model HFUC-32-100 (with the gear ratio of 100) that does not create vibration during the transmission of motion. Motion control can be employed by transmitting the angular velocity inputs from the computer to the

servo driver via the Adlink PCI-8366 motion card. The SSCNET system links the motion control card and driver in cascade form. The Adlink-ActiveX component serves to program the driver employing Visual Basic commands [16].

Table 1. The properties of the system.

Hexagonal form Manipulator Mass	60.2 g
Square Form Manipulator Mass	50.5 g
Triangular Form Manipulator Mass	49.4 g
Manipulator Lengths	372 mm
Sensor Mass	50 g
Sample Frequency	50 Hz
Sensor Distance to Endpoints	31 mm

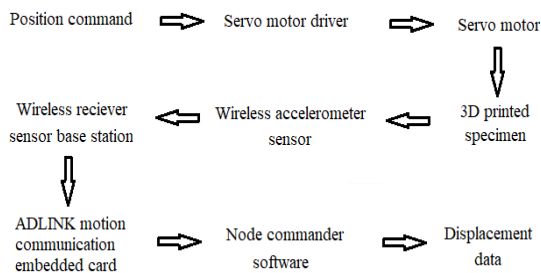


Figure 2. Scheme of the experimental setup

System identification is an approach to obtaining mathematical models of dynamic systems by using a specified input and output signal belongs the system. In control system design, one of the most important steps is building an accurate model of the system. If the obtained model does not represent the real behavior of the system, even the optimal controllers cannot provide optimum system output [17]. In this study, the System Identification Toolbox (SIT) of MATLAB was used to obtain vibration models of the beams. The system identification step in control system design is shown in Figure 3.

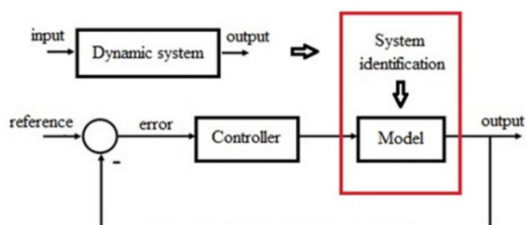


Figure 3. System identification in control system design.

SIT of MATLAB provides functions and blocks to build mathematical models of dynamic systems using measured input-output data. The toolbox helps the researchers to create and use

dynamic system models. Time-domain and frequency-domain input-output data sets are used to obtain continuous-time and discrete-time transfer functions, process, and state-space models. In this study, the discrete-time transfer function, discrete-time state space model, nonlinear ARX model, and Hammerstein-Wiener model were used to obtain the dynamic models. The application interface of SIT of MATLAB is shown in Figure 4.

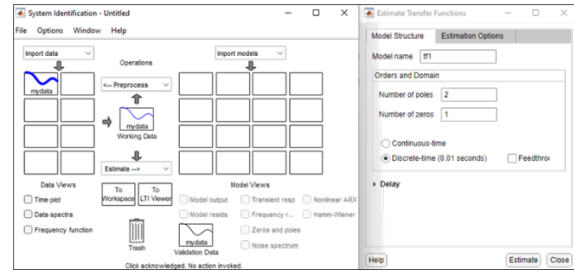


Figure 4. System identification application of MATLAB.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In the application interface of SIT, there are some options for the models. In the discrete-time transfer function section, the model includes 4 poles and 4 zeros were selected. In the discrete-time state space model section, model form, and order were respectively selected as free and 4. In the nonlinear ARX model section, the regressor type was selected as polynomial with order 4. In the Hammerstein-Wiener model section, a number of breakpoints were selected as 10 and the search method was selected as Levenberg-Marquardt. To evaluate the success of the obtained models, the goodness of fit value that is calculated by using Normalized Root Mean Square (NRMSE) was used as statistical criteria. The goodness of fit value of the models was given in Table 2, Table 3, and Table 4.

Table 2. The goodness of fit value for the model of the Triangular Lattice beam.

Model	Goodness of fit(%)
Discrete-time transfer function	97.67
Discrete-time state space model	78.81
Nonlinear ARX model	85.06
Hammerstein-Wiener Model	97.91

Table 3. The goodness of fit value for the model of the Hexagonal Lattice beam.

Model	Goodness of fit(%)
Discrete-time transfer function	90.77
Discrete-time state space model	41.43
Nonlinear ARX model	61.49
Hammerstein-Wiener Model	94.41

Table 4. The goodness of fit value for the model of the Square Lattice beam.

Model	Goodness of fit(%)
Discrete-time transfer function	96.75
Discrete-time state space model	73.68
Nonlinear ARX model	85.38
Hammerstein-Wiener Model	96.78

The highest goodness of fit value in Table 2, Table 3, and Table 4 is the model obtained for square formed beam by using the Hammerstein-Wiener approach. Figure 5 shows the measured and model output for square formed beam.

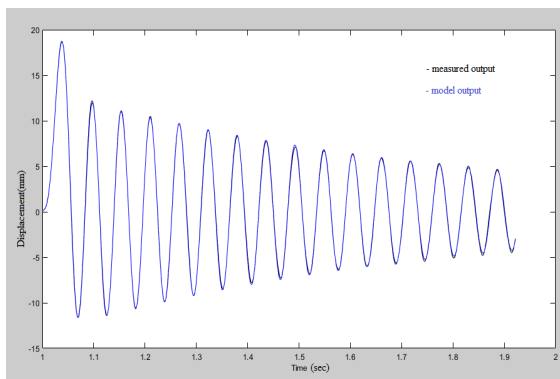


Figure 5. The success of system identification in MATLAB [18].

Tables 2, 3, and 4 show the success of different models for Triangular, Hexagonal, and Square formed beams, respectively. Accordingly, it can be said that all three different designs were modeled with approximate success. Additionally, Table 5 provides a comparison of the modal analyses for each beam.

Table 5. Natural frequencies of the beams

Specimen (Figure 1)	1. Natural Frequency [Hz]	2. Natural Frequency [Hz]
Triangular Form	17.70 ± 0.07	169.68 ± 4.33
Hexagonal Form	19.31 ± 0.08	174.06 ± 1.18
Square Form	17.59 ± 0.25	162.01 ± 1.63

5. CONCLUSION

It has been seen from Table 2 that the Hammerstein-Wiener model has the highest goodness of fit value with 97.91 while the Discrete time state space model has the lowest goodness of fit value with 78.81 for Triangular formed Beam. Table 3 shows that the Hammerstein-Wiener model has the highest goodness of fit value at 94.41 while the Discrete time state space model has the lowest goodness of fit value at 41.43 for hexagonal formed beam. Table 4 shows that the Hammerstein-Wiener model has the highest goodness of fit value at 96.78 while the Discrete time state space model has the lowest goodness of fit value at 73.68 for square formed beam. Results prove that the best model type to obtain vibration models of Triangular, Hexagonal, and square formed rotating beams is the Hammerstein-Wiener model. The order of the success of model types from the worst to the best is the discrete time state space model, nonlinear ARX model, discrete-time transfer function, and Hammerstein-Wiener model. After the model evaluation, the modal analyses result of the beams are also compared. It has been seen that a beam with a hexagonal form is the most stable since it has the highest fundamental frequency. And also, the orientation (square or triangular) of the support parts seems to be ineffective against natural frequencies.

In this study, the fast fourier transform (FFT) method was used to obtain the natural frequencies of the beams [7]. In the literature, the suitability of the system identification methods for vibration analysis of the beams was discussed [18]. Since the measured output and the model output are compatible, Figure 5 proves the suitability of system identification methods for obtaining dynamic models of flexible beams. Considering previous studies, it can be said that the results of this study are compatible with the literature.

It is known that as its natural frequency decreases, the structure becomes more flexible and more susceptible to vibration. Considering Table 5, the natural frequencies of the square and triangular forms seem quite similar. It is clear that the support element arrangements (in a diagonal or horizontal configuration) have little impact on the bar's stability. On the other hand, it is noticeable that the fundamental (initial) natural frequency is higher when examining the beam that is formed in the shape of a Hexagonal. This indicates that the hexagonal-shaped beam is the most stable specimen used in the investigation.

The number of 3D-printed engineering designs with lattice structures have been increased in literature [19-20]. The contribution of this paper is to include lattice structures, additive manufacturing, and also vibration analysis.

In future studies, multi-link flexible systems can be considered a good candidate since the increase in degrees of freedom brings an increase in nonlinearity. In addition, experimental and numerical studies on the design and analysis of vibration-damping elements with various lattice structures for a real system with vibration are thought to be promising.

ACKNOWLEDGES

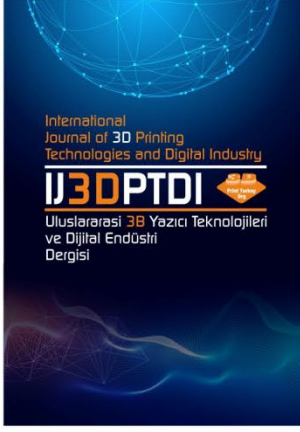
No funding was received to assist with the preparation of this manuscript.

REFERENCES

1. De Luca A., Book W.J., "Robots with Flexible Elements BT - Springer Handbook of Robotics", Pages 243–282, Springer International Publishing, Cham., 2016.
2. De Luca A., "Flexible Robots BT Encyclopedia of Systems and Control", Pages 814–822, Springer International Publishing, Cham, 2021.
3. Yavuz Ş., İlman M.M., "Stress and rigidity comparison and improved vibration control of flexible carbon-fiber and epoxy-glass composite manipulators under end-point load", Mater Res Express, Vol. 6, Issue 3, 2018.
4. İlman M.M., Yavuz Ş, Karagülle H., Uysal A., "Hybrid vibration control of an industrial CFRP composite robot-manipulator system based on reduced order model", Simul Model Pract Theory, Vol. 115, Page 102456, 2022.

5. Kaya M.O., "Free vibration analysis of a rotating Timoshenko beam by differential transform method" Aircr Eng Aerosp Technol, Vol. 78, Issue 3, Pages 194–203, 2006.
6. Ergene B. "Çatlak Derinliğinin ve Fiber Açısının Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Kirişin Titreşim Davranışına Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi ile Belirlenmesi" Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 120-129, 2021.
7. Shao M., Huang Y., Silberschmidt V. V. (2020) "Intelligent Manipulator with Flexible Link and Joint: Modeling and Vibration Control", Shock Vib., Vol. 2020, Page 4671358, 2020.
8. Yavuz Ş., Karagülle H., "Analysis of vibration control of a single-link epoxy-glass composite manipulator by FFT method", J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. Vol. 36, Issue 2, Pages 685–699, 2021.
9. Ayyad A., Chehadeh M., Awad M.I., Zweiri Y. "Real-Time System Identification Using Deep Learning for Linear Processes with Application to Unmanned Aerial Vehicles", IEEE Access Vol. 8 Pages 122539–122553, 2020.
10. Ali A.A., Lateef R.A.R., Saeed M.W., "Intelligent tuning of vibration mitigation process for single link manipulator using fuzzy logic", Eng. Sci. Technol. An. Int. J. Vol. 20, Issue 4, Pages 1233–1241, 2017.
11. Woodward I.R., Fromen C.A., "Scalable, process-oriented beam lattices: Generation, characterization, and compensation for open cellular structures", Addit. Manuf., Vol. 48, Issue A, Pages 102386 2021.
12. Li M., Zhu H., Lai C., Bao W., Han H., Lin R., He W., Fan H., "Recent progresses in lightweight carbon fiber reinforced lattice cylindrical shells", Vol. 135, Pages 100860, 2022.
13. Babamiri B.B., Barnes B., Soltani-Tehrani A., "Designing additively manufactured lattice structures based on deformation mechanisms", Addit. Manuf. Vol. 46, Page 102143, 2021.
14. Dokuz M.E., Aydın M., Uyaner M., "Production of Bioactive Various Lattices as an Artificial Bone Tissue by Digital Light Processing 3D Printing", J. Mater. Eng. Perform., Vol. 30, Issue 9, Pages 6938–6948, 2021.
15. Çantı E., Aydın M., "Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts", Rapid Prototyp J, Vol. 24, Issue 1, Pages 171–176, 2018.

16. İlman M.M., Yavuz Ş., Karagülle H., Uysal A., “Hybrid vibration control of an industrial CFRP composite robot-manipulator system based on reduced order model”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 115, Page 102456, 2022.
17. Özbaltan M., Berthier N., “Exercising symbolic discrete control for designing low-power hardware circuits: an application to clock-gating”, *IFAC PapersOnLine*, Vol. 51 Pages 120–126, 2018.
18. Reynders E., “System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison”, *Arch Comput Methods Eng*, Vol. 19 Pages 51–124, 2012.
19. Çaşka S., Gök K., Aydın M., Özdemir, İ., “Finite Element Method Based Structural Analysis of Quadcopter UAV Chassis Produced With 3D Printer”, *Journal Of Science And Technology Of Dumlupınar University*, Vol. 44, Pages 24-32, 2020.
20. Rashid R., Masood S., Ruan D., Palanisamy S., Huang X., Rahman R. R.A., “Design Optimization and Finite Element Model Validation of LPBF-Printed Lattice-Structured Beams”, *Metals*, Vol. 13, Pages 1-26, 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>

**DIGITALIZATION
MANAGEMENT**

IN

BUSINESS

Yazarlar (Authors): Ayla Avcı 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Avcı A.,
“Digitalization In Business Management” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 328-
352, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1309831

Derleme Makale/ Review Article

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

DIGITALIZATION IN BUSINESS MANAGEMENT

Ayla Avci^a ^{*}

^aAntalya Belek University, Economics and Administrative Sciences Faculty, International Trade And Business Department, TURKEY

^{*} Corresponding Author : ayla.avci@belek.edu.tr

(Received: 05.06.23; Revised: 08.07.23; Accepted: 13.08.23)

ABSTRACT

Rapid innovations in the field of technology have become a driving force in ensuring a new management approach and sustainability, especially in companies. Namely, this rapid transformation has made it necessary for managers with technical knowledge and equipment to come to the fore in company management and use technological infrastructure and systems in all companies. While the managers of the classical period were not allowed to make decisions, today, thanks to the specialized communication networks of all units, the ease of information flow has been the most critical factor in developing joint decision-making. In addition, the fact that the managers made technological facilities, tools, and equipment applicable and usable in the companies significantly changed the competitive sustainability face. The use of technology and digitalization in business management and all other units has brought a new digital perspective to business. From the beginning of the industrial revolution to Industry 5.0, the last point reached digital transformation plans are applied as a new road map for the future in units such as marketing, accounting, entrepreneurship, and supply chain in management. In this research, digitalization studies in management marketing, accounting, human resources, entrepreneurship, and supply chain management in 2022 were examined in the literature. This research emphasized that digitalization is indispensable in these areas and has significant and beneficial effects in providing positive performance.

Keywords: Digital, Management, Technology, Industry 5.0.

1. INTRODUCTION

How to be best at the beginning of management science? While focusing on a single goal, emphasis was placed on individual needs that push employees to be successful in the workplace (Hussain et al. [1]). With the development of digital technologies, the importance of digital literacy is preferred by companies with technology-oriented business methods. The main target is having a strong education and learning process in institutions and having human resources with technological knowledge, skills, and equipment (Atay et al. [2]). At the same time, companies caused the collapse of business models and companies due to disruptive innovation; on the other hand, the rise of innovative companies with business models revealed their competitive advantages in the last ten years (Caputo et al. [3]).

Today, the business world has increased with the increase in global competition. Now, industrial markets have started to create new markets by crossing borders. It develops new digital technologies and models to provide competitive advantage, sustainability, and business development in global markets. In today's competitive business world, production operations have adopted advanced production technologies such as 3D printing and rapid prototyping and benefited from the Internet of Things for information and analysis. The enterprises aim to optimally provide customer demands, quantity, quality, and price in today's competitive and turbulent environment (Agrawal & Narain [4]).

Digitalization allows organizations to collaborate between companies, suppliers, customers, and employees and create various new service and product offerings (Möller et al. [5]). Companies must reconsider strategic business model development components to implement digital transformation and dynamic capabilities. It should integrate these capabilities into the reality of digital platforms (Monge & Soriano [6]). Therefore, digital transformation is an emerging topic, and more research is needed (Imgrund et al. [7]). This research aims to shed light on the future by considering the digital transformation processes carried out in various departments that comprise the whole business management.

This research deals with the issue of digitalization in management. Literature studies carried out in 2022 within the scope of marketing, accounting, human resources, entrepreneurship, and supply chain management which are the most critical units of enterprises, were examined.

2. INDUSTRIAL REVOLUTIONS AND DIGITALIZATION

Technological developments have led to a rapid increase in web technologies. In the training of the employees of the institution, besides the web-based training, the technical supports of the modern age have been utilized, very different from the traditional training methods such as distance education and electronic education (Atay et al. [2]). Digital ecosystems are not only interesting for the information technology and software industries, but digital technologies are becoming more and more critical in all industries (Monge & Soriano [6]). Enterprises have been forced to accelerate their digital transformation to compete and ensure the sustainability of many companies during the Covid-19 process (O'Brien [8]).

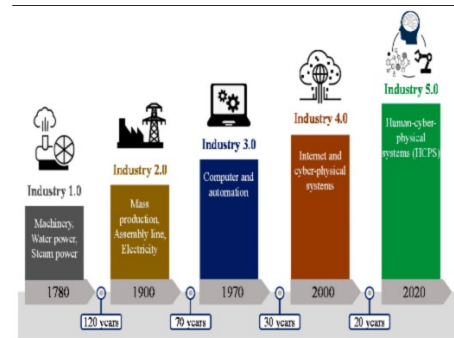


Figure 1: Industrial change processes (Chen et al. [9]).

The industrial revolution, the first industrial revolution, had radical effects on the manufacturing industry in the mid-1700s with the development of steam engines and by enabling the production of these machines and factories. The second industrial revolution harnessed the power of electricity. At the end of the 1800s, with the rapid production of mass-production products, people's ideas and production processes began to develop in different dimensions. In the early 1900s, the 3rd Industrial Revolution started the digital age. The establishment of information, distribution, and storage networks with main computers and the gathering of producers and consumers connected to the internet with personal computers were ensured. The fourth industrial revolution began in the 21st century when machines and devices provided unlimited information to people fastest and most effectively (Noble et al. [10]). Technological developments from Industry 4.0 to Industry 5.0, along with the industrial change processes from the past to the present technological innovations such as intelligent materials, drone technology, artificial intelligence technology, internet of things, and quantum computing are moving towards 5.0 at an incredible speed (Chen et al. [9]).

3. DIGITALIZATION IN MANAGEMENT

Management developed more than 100 years ago in the 21st century. The industrial age continues to exist in the industrial age with the new paradigm of specialization, hierarchy, and control. 21st-century organizations face unique challenges thanks to the accelerating pace of technology, digitalization, and modernization (Akmaeva et al., [11]).

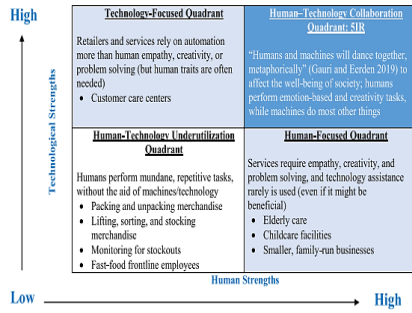


Figure 2: 5. Industrial Revolution (5.0) maximizing human and technological powers.

Taking a themed fifth industrial revolution to the next level is essential to creating it with the synergy of human and technological powers (Figure 2). (Mende and Noble, [12]). In recent years, companies have created a digital technology portfolio such as artificially intelligent systems, the Internet of Things, the cloud, big data, and intelligent transportation system (Cardinali & Giovanni, [13]).



Figure 3. Digital transformation in business <https://www.i-scoop.eu/>.

DT in companies consists of many challenges, interactions, internal and external factors, and processes. Internet access, mobile devices, and the use of social media networks are the starting point of digital transformation for institutions to communicate (Dülek & Aydın, [14]). Digital transformation covers internal and external factors, technological developments, industries, stakeholders (Figure 3). Digitalization has been emphasized in flexible organization design and internet technology logistics and supply channel management to improve knowledge and performance in the organization in management (Monge & Soriano [6]). Digital management combines human judgment and business intelligence with the widespread use of digital data and technologies (Möller et al. [5]).

4. DIGITALIZATION IN MARKETING MARKETING MANAGEMENT

Today, institutions' digital transformation has revealed the necessity of creating the assets of the brands entering the market through the digital platform. Customers can meet products and services in the digital environment, with digital tools and platforms as the front face of brands, the speed and ease of two-way communication and feedback between the brands in the market and the consumer. The most critical issue in digital marketing is digital brand management. It is essential to create the brand's logo, aims, and messages on web pages and to design it online with mobile compatibility. In this way, it is the most effective method in providing customer demands and needs online, fast feedback, personalized brand messages, and brand loyalty. One of the essential purposes of digitalization in marketing should be to bring the communication and position of brand management to a critical level in digital environments and social media tools by making applications that accurately describe the brand identity and make the brand valuable (Dülek & Aydın, [14]).

Table 1: Digitalization in Marketing Management Literature Studie

Author Year	Purpose	Method	Results
1. Riofrio et al. [15]	Investigating the durations of market digitalization on firm performance in Latin America	Practical	Many Latin American firms fail to reap the benefits market digitalization and performance drops as a result. The appropriate way to tackle market digitalization is implementing a restructuring strategy
2. Kaur et al. l. [16]	It aims to discuss all technologies that enable Industry 4.0 in marketing to ensure sustainability in terms of social, environmental, and economic goals	Theoretical	The study presented vital recommendations for future development and adoption to create innovative infrastructure in a sustainable environment
3. Hua, [17]	What are the benefits and complications of digitizing online art transactions and art viewing?	Theoretical	To keep up with the rapid market changes, galleries and auctions have allocated more resources to digital platforms and it is seen that cooperation between regions and countries has increased in marketing and exhibition activities in the art industry
4. Kim Man & Yang, [18]	Discussion of incentives, opportunities, threats, and problems brought by digital marketing Malaysia.	Theoretical	Attention of companies to apply digital marketing in their business activities. Development of digital marketing and discussion results in the Malaysian context raises more awareness
5. Mostaghel et al., [19]	Understand how digitization affects changes retail business model innovation dimensions	Based on bibliometric and network analysis and visualization,	Embedded digital technologies power business model retailers with the agility to respond to dynamics and volatile market situations
6. Lanenko et al., [20]	Unique prospects caused by new developments marketing technologies	Literature review	The authors conclude that the pandemic has had a strong impact. The push for digitalization of marketing reveals several previously hidden
7. Masrianto et al., [21]	The research offers a digital marketing usage index (DMUI) to evaluate and improve a company's digital marketing	Theoretical	They can improve their digital marketing skills by increasing the role of managerial innovation, organizational readiness and perceived usefulness. In addition, business must realize digital transformation by managing the transformation and the reinvention of new business model.

8. Qian et al., [22]	Problems hindering the sustainable growth of this industry and it was adopted in this study to analyze text data from experts to explore the reasons behind this shortcoming	Literature review Thematic analysis	The findings are aimed to help solve the education and human resource issues in the hospitality industry
9. Terho, et al., [23]	To address the important knowledge gaps in current research this study is aimed at customer- centered B2B markets. Relevant marketing research flows.	Empirical, Theoretical, Literature review	The results of this study offer concrete managerial guidance for developing and implementing strategic digital content marketing (DCM) activities in a customer centric way
10. Shankar et al., [24]	A review of the literature between 2000 and 2021 for researchers and practitioners	Literature, review	Find it relevant to digital marketing communication mostly at the national level for specific, digital marketing rather than the global level
11. Hagen et al.,[25]	Websites and social media pages, it has been determined to what extent the sources of PMPs affect their adoption and frequency of updating	Theoretical	Collective digital marketing channels, the shopping area is affected by the update frequency of these channels and the organizational resources of the shopping center
12. Setkute & Dibb, [26]	To increase the understanding of digital marketing in B2B SMEs, examine the barriers they face and digital practices	Literature review	How digital marketing is used and benefits by small B2B firms
13. Behera et al., [27]	Cognitive Computing Based Ethical Principles for Improving Organisational Reputation: A B2B Digital Marketing Perspective,	Theoretical & Literature review	Enabled B2B Digital marketing to showcase ethical challenges and ethical practices
14. Barykin et al., [28]	A new Pandemic the transportation industry and the application of technologies related to renovation and modernization transportation system facilities	Literature review	The challenges inherent in digital marketing are modes of transport considering the increasing competition between industries
15. Keke, [29]	Its aims to relationship between brands and consumers in the Turkish digital marketing	Theoretical and Literature review	Digital marketing and social media campaigns contribute to the promotion of different companies and the advantages they bring
16. Lopes, [30]	Content marketing management strategy recommendations for digital marketers are included	Literature review	Content marketing conceptual review of digitalization guiding managerial implication
17. Purwanto, [31]	Marketing purchasing decisions have tested the effective marketing strategy of the digital marketing strategy	Theoretical	Digital marketing is significantly positively correlated with purchasing decisions and brand image

18. Amjad, [32]	Digital Entrepreneurial Marketing developing, and developed countries are used equally	Bibliometric analysis	Digital marketing is an important part of entrepreneurial marketing
19. Kerdpitak, [33]	It's stated that encouraging performance in quality, digital marketing and supply chain management in cultural tourism depends on innovative management and	Theoretical	Innovative management methods digital marketing can bring the potential to increase service quality and supply chain management
20. Kurdi et al.,[34]	Study of digital marketing addressed the role of the costumer purchasing decisions	Theoretical	The role of digital marketing channels on consumers purchasing decisions supports the impact of digital marketing channels on consumers purchasing decisions

5. DIGITALIZATION IN ACCOUNTING MANAGEMENT

Along with digitalization, the digitalization of accounting management attracts the attention of practitioners and the scientific environment. Digital transformation is starting a new business with operating model technologies to implement and integrate digital. The purpose of digitalization of management accounting for an organization (Platov et al., [35]):

- Helping to reveal new organizational capabilities, providing flexibility in the business

- Automation and acceleration of the circulation of inventory items
- Ensuring uninterrupted communication between the supply chain and accounting structural units in a holistic manner

The accounting profession, which needs a radical change, must adapt to this digital transformation while maintaining time to ensure sustainability. Otherwise, they will be unable to compete with other professionals who have adapted and may experience severe problems and difficulties maintaining their existence in current conditions (Sabuncu, [36]).

Table 2: Digitalization in Accounting Management Literature Studies

Author Year	Purpose	Method	Results
1. Hasibuan et al., [37]	Using the input processing and editing of files in business bodies is part of digitization	Literature review	Good use of the tools of the digital age plays a very important role in ensuring the digitalization of accounting
2. Agostino et al., [38]	Discusses the status and future research directions of research directions of research on digitalization, accountability, and accounting in public services	Literature review	Accounting journals often seem to ignore the digitized public sector and instead focus on the private sector
3. Şen & Terzi, [39]	Units of Artificial Intelligence and Digitalization in Accounting Education are to Evaluate	Literature review	Finance and accounting workplace on artificial intelligence background some parts of it are replaced by intelligent robots

4. Jans et al., [40]	Literature survey of specialized accounting information system in accounting	Literatür review	Internalist view, which may be a possible explanation of accounting information systems research topics have difficulty being accepted as part of accounting research
5. Varaniute et al.,[41]	Accounting in product development understanding how research progresses accordingly digitalization, sustainability and circularity aspects identify the changing role of management accounting in product development understand how research progresses accordingly	Bibliometric analysis and a systematic literature review	Results which can be regarded as the main driver of changes in management accounting in the product revealed that aspects of development are related to innovation
6. Coman et al., [42]	Article theoretically it is a survey-based empirical research applied in economics and includes both decision makers and professional accountants	Theoretical	Suggest that digitalization is more than a conventional change, being equally about technology and people
7. Mutlu et al., [43]	It aims to examine the remote working framework and adaptation to digital transformation due to Covid-19 and the responses of professional accountants on this issue	Empriacelly	Accountants stated that digital transformation and remote working accelerated during the pandemic period
8. Awang et al., [44]	Examined the perception of both opportunity and risk related to digitalization	Theoriticl	The results revealed that the digitalization of the accounting profession is promising
9. Güney, [45]	The importance of digitazliation in accounting and the interaction of digitalization with accounting information systems and accounting education have been revealed	Literature review	A great contribution will be made to the profession with the implementation of the education model in which digitalization and digital literacy can be given in accounting education
10. Zhang et al., [46]	Includes redesign, reconfiguration and re cooke	Theoretical, Literature review,	Learning and accumulating organizational skills, digitalization, both firm and managerial characteristics, can affect a firm's digital strategy
11. Sabuncu, [36]	Evaluation of accounting practices how is the digital transformation met by accountants?	Theoretical, Literature review	The profession which needs a radical change, must adapt to this digital trnasformation without delay to survive

12. Murodovich Ziyadullaevna, [47]	&	To identify the problems that arise in the process of digitalization of accounting with the development of digital information technologies	Literature review	It will provide a great advantage to the industry in the application of blockchain technology in accounting
13. Taib et al.,[48]		Technological knowledge and preparation for the links between the digitalization of the accounting profession and future accountants has been explored	Theoretical and literature review	Changes from technology fundamentals to current accounting practices are significant
14. Awyong et al.,[49]		Examines the impact of firm digitization and digital skills on demand for corporate accounts	Theoretical and literature review	For a company to take advantage of its own investment in employee's digital skills and digitalization strategy is required
15. Brabete & Goagara,[50]		Automation, robotics, artificial, intelligence and digitalization in accounting practices has been explored	Literature review	The limitations of accounting and digitalization in this area will also be examined
16. Pham & Vu, [51]		Statistical digitalization of accounting information among small and medium sized enterprises (SMEs) digitalization of accounting information (DOAI)	Qualitative & quantitative data	The impact of digitalization on the business operations of SMEs, the size of the DOAI was found to be a difference in the effectiveness of SMEs
17. Yakut, [52]		The effects of digital literacy on the productivity of accountants are analyzed	Theoretical	Digital literacy increases the productivity of accounting employees
18. Mert et al., [53]		The development of digitalization process and the effects of digitalization on accounting practices were investigated	Theoretical	It has been determined that accountants follow and apply developments and professional practices related to digital technologies
19. Tekelioğlu, [54]		Accounting profession to determine the perceptions of the profession towards the digitalization of the profession	Theoretical and literature review	Accountants who consider digital transformation necessary and determined that they are open to change
20. Yalçın, [55]		Industry to understand accounting and auditing	Literature review	Accounting, finance, and information technologies have now become an inseparable whole

6. DIGITALIZATION IN HUMAN RESOURCES MANAGEMENT

Digital technologies have made companies transparent about salary levels and conducting interviews. Information about the company is provided via the Internet. Bad reports about the company soon become public. The feedback

received from company employees in mobile human resources applications has increased ten times more. With digitalization, barriers between work and private life are lifted. Employees are available anytime and anywhere (Fedorova, vd, [56]). Digital technologies from Industry 4.0 are used by all sectors and human

resources management operating in the digital age. Big data and artificial intelligence assist in selecting high profiles in CV selection, which

was previously performed manually (Silva vd, [57]).

Table 3: Digitalization in Human Resources Management Literature Studies

Author Year	Purpose	Method	Results
1. Silva et. al., [57]	Contribute to the theoretical development of human resource management	Bibliometric analysis, literature review	Industry 4.0 encourages leading the industry and HRM professionals, organizations, and workforce. They must face the challenges of industry 4.0
2. XingShu et al., [58]	Intelligent management of human resources as well as extensive social governance capability in China, it plays a decisive role in the effectiveness of community management organizations and the effectiveness of external human resources	Literature review	Human resources management organizations, it can effectively improve the government's administrative efficiency and service quality
3. Zavyalova et al., [59]	Compenents of HRM digitalization important characteristic of organizations (size, staff, structure, staff, turnover, performance data analysis)	Theoretical and literature review	Shows that compnaies that are more successful in digitalization have more flexibility
4. Zavyalova, et al., [59]	Compenents of HRM digitalization important characteristic of organizations (size, staff, structure, staff, turnover, performance data analysis)	Theoretical and literature review	Shows that compnaies that are more successful in digitalization have more flexibility
5. Kodua et al., [60]	Contributes to green human resources by researching and analyzing GHRM implementation barriers	Theoretical and Emprical	To advocate and enforce sustainability globally, GHRM it has received a lot of attention lately GHRM application the developing country like Ghana is facing many problems and challenges. These hurdles need to be overcome to implement GHRM
6. Kambur, [61]	Artificial in the article the effects of intelligence on human resources processes were investigated	Literature review	The use of artificial intelligence in the field of human resources in Turkey little work in the summer and it has been revealed that there is a need for research on this subject
7. Oruçoğlu, [62]	Within the scope of Industry 4.0 new applications and effects in HRM functions were investigated	Qualitative content analysis	Industry the most affected functions in the human resources area of 4.0 have been determined

8. Murugesan, [63]	The contributions of artificial intelligence to HR digitilazation and its applications in the industry have been reserached	Theoretical and literature review	Possible areas of Human resource management of Artificial Intelligence concepts can be applied in various fields
9. Athira, [64]	The role of the HR departmanet	Literature review	Organization HR departmant are the best players within the company in keeping employees productivite, motivating and loyal
10. Al Haziazi, [65]	Challenges in digitizing human resource management in the Middle East	Literature review	There must be HR management to manage change throughout the organziation where talent development and skill development are important
11. Lanenko et al., [20]	Claiming that Covid-19 has become a seriouspheonemenon changing consumer behaviour our and significantly accelerated	Literature review	The pandemic is a strong the drive to digitize marketing reveals several previously hidden issues
12. Padhy, et al.,[66]	The necessity of digitalization in human resources and benefits for employers	Literature review	Digization recruitment of HR managers and outstanding staff help evaluate employees
13. Alanlı,[67]	The impact of digitalization on HRM in the public sector managers to demonstrate to identify their experiences	Theoretical	Towards digitization of HRM in the public sector the benefit of the application
14. Fenech, [68]	To investigate how human resource management undergraduate students perceive human resource management in the digital age	Theoretical and literature review	HR is a result of technology literacy
15. Cooke et al., [69]	If we adopt a human-centered approach to human resources management (HRM) it will, contribute to creating sustainable workforce, organizations, and societies in an environment of chaos and uncertainty	Literature review	Conceptualizing HRM models and practices and expanding HRM theories can contribute
16. Şaşmaz, [70]	An overview of human resource management in digital transformation	Literature review	With the pandemic processes, all business processes have started to take place on the digital platform
17. Durmaz ve Burçak, [71]	The structuringrequired for the application of artificial intelligence in human resources has been covered	Literature review	For the effective implementation of artificial intelligence, it is necessary to develop resources and prepare the business for this, providing training and development to employees

18. Kaçık & Aykan, [72]	Its purpose is to connect society 5.0 and HRM to explain	Literature review	HRM when faced with some of the challenges of society 5.0 it may be appropriate to implement strategies
19. Sönmez & Kalaycı, [73]	The transformation of human resource management has been covered	Literature review	After the field of finance digitalization is mostly applied in the field of human resources
20. Demirci et al., [74]	The impact of digitalization on HRM practices examined Largely Positive effects observed	Literature review	Positive and negative aspects of digitalization there are effects, but the positive effects are significant

7. DIGITALIZATION IN ENTREPRENEURSHIP MANAGEMENT

Digital entrepreneurs aim to make sales by turning companies into giant players. Digital technology entrepreneurship combines technology elements as a concept (Giones & Brem, [75]). The meeting of new digital technologies such as mobile and cloud computing, social media 3D printing, and data analytics with innovation and entrepreneurship has shaped the search for entrepreneurship. The questions asked for academic entrepreneurship in Figure 4; the reasons for the adoption of technologies to achieve academic goals (who), the processes in which digital technologies are activated, entrepreneurship (how), and new digital academic entrepreneurship (what) questions and the impact of digital technologies on academic entrepreneurship are discussed

(Rippa and Secundo, [76]). Although digital transformation brings benefits, how to do it and the potential effects of business development, old and new, should be considered (Zhang & Chen, [77]).

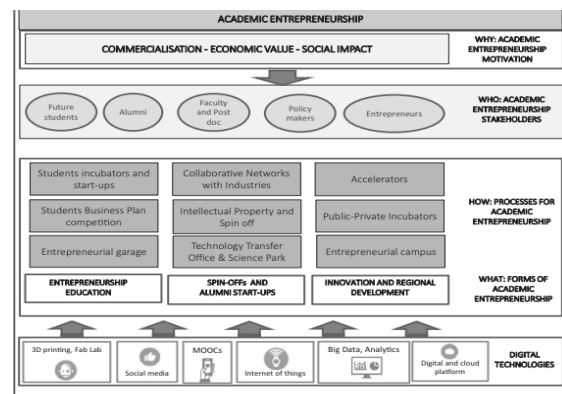


Figure 4. Academic entrepreneurship. (Rippa & Secundo, [76])

Table 4: Digitalization in Entrepreneurship Management Literature Studies

Author Year	Purpose	Method	Results
1. Orrensalo et al., [78]	Inclusion and digitization between 1990 and 2020, critical literacy of entrepreneurs and information search domains and histories.	bibliometric and literature review	Digitalization has affected critical literacy and information-seeking behaviors and processes
2. Chatterjee et al., [79]	Exploring the contemporary demographics of SME entrepreneurship and to identify the regulatory roles and potentials of entrepreneurs' demographics and education in digital adoption.	Literature review Theoretical and practical	Entrepreneurs who are already successful and use digital platforms efficiently will be role models for start up entrepreneurs

3. Bertoni et al., [80]	Developing understanding of the impact of digitalization on the market for entrepreneurial finance	Literature Review	review	The digital revolution raises interesting policy issues. The extent to which regulators need to intervene to stop or encourage it
4. Gallego et al., [81]	Sustainability context and Green Supply Chain Management (GSCM) literature digital technologies (DTs) and green human resource management on economic and environmental issues	Theoretical and empirical	and	Research findings demonstrate that both green human resources and digital technologies adaption are relevant enablers. GSCM will then pursue better environmental and economic performance
5. Ghazy et al., [82]	The determine the relationship between entrepreneurship and productivity for 27 EU member states using panel data	Empirical analysis and Literature review		A positive relationship was found between entrepreneurship and productivity and a positive relationship was found between digitalization and entrepreneurship
6. Fernandes et al., [83]	The literature on digital entrepreneurship platforms that creates a holistic picture of the different aspects of the field and trends were studied with bibliometric approaches	Content and Thematic analysis		In the field of digital entrepreneurship at the methodological level, the bibliometric approach understands the relationships between authors and research flows and shows how the research area is structured
7. Ratten, [84]	As a way for rural farmers to connect with the urban environment presents the results of a study initiated with consumers on its digital platform	Theoretical literature review	and	Demonstrates how digital platforms can be used to generate transformational entrepreneurial outcomes in times of crisis
8. Panagaria, [85]	It presents examples of entrepreneurship through the impact of digital financialisation the creation of new web-based services directly in the fintech space and the rise of the internet	Theoretical		Native of India and the need for foreign investors to take part in the digital field is absolute
9. Dana et al., [86]	Determined the effects of digital technology factors and urban entrepreneurship in smart cities on sustainable businesses	Quantitative and qualitative analysis	and	Digital technologies are important in the smart city business environment as a solution to ensure sustainability
10. Modgil, [87]	Diffusion theory of innovations research has been conducted on the opportunities for digital entrepreneurship Covid-19	Thematic analysis		It uses the theory of diffusion of innovation with the opportunities of digital entrepreneurship stemming from Covid-19 as its basis

11. Al-Mamary, S. H. Y. et al. [88]	The most famous intent theory TPB model has been tested	Theoretical and review	In the field of Entrepreneurial intent of the TPB model applicable in Saudi Arabia, the model was applied to help develop the field
12. Himki, et al., [89]	Digital studies which have a significant impact on entrepreneurship have turned into an accessible model and format for all sectors	Theoretical	Business that applies the concept of e business management in their operations tend to be longer-lasting and more competitive in the market however organizations that do not want to implement the concept of e business cannot achieve sustainability
13. Xu et al., [90]	Explored what kind of digital capability could be built to drive an increase in digital sustainability	Theoretical	Digital sustainable entrepreneurship (DSE), in providing sustainability, there is a significant relationship between digital capability (DC) and digital innovation orientation (DIO)
14. Baig et al., [91]	The research identified six streams of digital entrepreneurship. for example the entrepreneurship procedure	Literature review	Review of recent digital entrepreneurship in different fields created a framework for in-depth understanding
15. Baranauskas & Raisiene, [92]	An overview of the impact of digital entrepreneurship. Studies were conducted on sustainability and digital business ecosystem areas	Theoretical and Literature review	Short-term transition from traditional entrepreneurship to digital entrepreneurship achieved significant growth but the number of digital businesses has revealed new challenges and needs
16. Sadigov, [93]	Current digitalization trends in terms of business innovation the level of impact during the covid-19 outbreak has been studied	Theoretical literature review	According to the results the business sector has become heavily depend on the proliferation of digital technologies
17. Schiuma & Carlucci, [94]	There are six critical competencies for the transformative leadership profile that supports the digital transformation development of businesses	Literature review	Defines the theoretical foundations for developing research and empirical methods on leadership traits that hinder and enable companies' digital transformation

18. Sedera et al., [95]	Digital scientific studies that illuminate the subject of business transformation in the fields of innovation and entrepreneurship	Literature review	Dijital business transformation can be considered the single most important force to thrive in an extraordinary time
19. Tao et al., [96]	Digital business transformation in innovation and entrepreneurship is explored with is entire nomological network	Theoretical	Promoting public entrepreneurship, the digital economy is an important mechanism for developing high-quality
20. Steininger et al., [97]	Whether there are established assumptions that support the emergence of digital technology entrepreneurship theories, and their effects are explored	Theoretical and literature review	Measures on digital entrepreneurship policy its impact on fostering creativity and growth of digital startups in particular there is no micro-economic evidence

8. DIGITALIZATION SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

Technological developments in recent years have forced supply chain managers who want to digitize their existing businesses to identify the opportunities and threats they face. Therefore, the business model needs to be digitized. Various paradigms have been proposed to ensure sustainability due to the devastating effects on production systems, warehouses, and distribution networks experienced by Covid-19. For supply chain managers, it represents deep knowledge and steps to make the supply chain happen cyclically for continuous improvement over time. The advantage of using digital supply chain twin simulation software in the digitization phase of the supply chain (Longo et al., [98]). The supply chain reacts more than once to unexpected events. In this approach, since no intervention strategy is required to be implemented, it is economically efficient, and errors and wastes are minimized. Figure 5

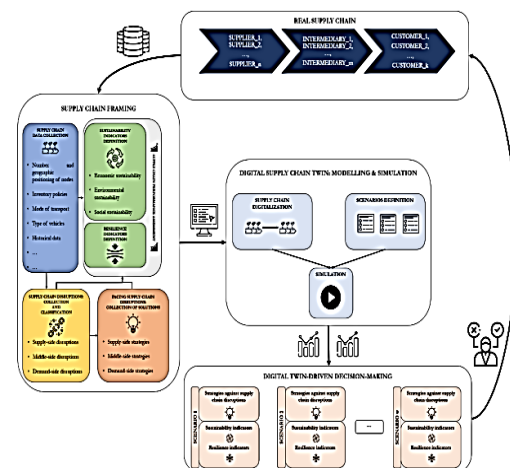


Figure 5. Simulation- Digital supply chain twin paradigm (Longo et al., [98]).

Benefits of the digital supply chain (Agrawal & Narain [4]):

- ✓ Better decision-making tool transparency
- ✓ Inventory levels are also less as just-in-time supply is used more
- ✓ Clear visibility of inventory levels as it is fully integrated into the chain
- ✓ Less decentralized storage in reducing delivery times
- ✓ Shortening of the delivery time as the number of stages in the sales chain will decrease

- ✓ A better understanding of demand and a better understanding of customer requirements through up-to-date sales
- ✓ Provides higher sales, higher profits, and better customer relations
- ✓ Reducing risks and costs thanks to the flexibility of the chain with the development of the supply chain
- ✓ Better results in supply chain decisions with more alternative options in decision-making processes
- ✓ Sustaining competitive advantage

Cloud service, Artificial Intelligence, IT, and IoT framework to CAB²IN aims to ensure sustainability throughout the life of the supply chain by classifying management activities as data collection and information. It is aimed to meet the requirements of production and sharing, and sustainability Figure 6 (Liu et al., [99]). According to (Ali, [100]), the most important trends identified in research on supply chain management are the widespread use of industry 4.0 elements and blockchain in the traditional supply chain: But there is also a need to explore community industry 5.0 to improve the human-machine relationship that has been hit hard by Covid-19.

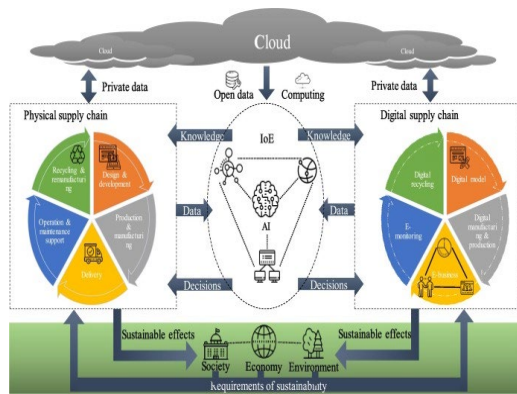


Figure 6: CAB²IN model for Sustainable Supply Chain Management, Liu et al.,[99]

Table 5: Digitalization of Supply Chain Management Literature Studie

Author Year	Purpose	Method	Results
1. Bigliardi et al. [101]	It aims to explore the main discussion themes related to supply chain digitization using a keyword-based arrangement	Literature Theoretical	review Distribution heavily applied and sustainability and circular economy concepts digitalization it is used in the industry sector where digitalization is experienced as well as the basic concepts of industry 4.0
2. Selivanova, et al., [102]	Global digitalization is to develop proposals for the improvement of accounting and accounting. In the contexxt of global digitalization.	Literature review Theoretical	According to the analysis of the enterprise’s activities, accounting for settlements with foreign suppliers can be improved in two aspects ‘‘Settlements with suppliers and contractors

3.	AlNasrallah & Saleem, [103]	In the economy moving towards rapid transformation in Saudi Arabia determinants of A-adaption	Theoretical	A sustainable workplace is an outcome of the process and procedures
4.	Burgess et al., [104]	It aims to offer a blockchain-based quality management developed for short food supply chains	Theoretical and literature review	Blockchain provides a unique ability to store quality and relevant data for short food supply
5.	Murodovich & Ziyadullaevna, [47]	Justification of the need for digitalization in the field of accounting, identification of the main digital technologies in accounting and their advantages and disadvantages	Literature review	The digital economy expands the capabilities of a modern accountant improves the quality and efficiency of accounting, creates modern innovative approaches to the integration of various types of accounting
6.	Taib et al., [48]	Theoretical and empirical research	Technological knowledge and preparation for future accountants' digitization of the accounting profession	More skilled accountants will use technology better
7.	Ye et al., [105]	Theoretical and literature review	The Covid-19 pandemic, therefore long-term impact of Digital Technology asset allocation on supply chains	Deploying DT assets to varying degrees reveals both breadth and depth of DT asset distribution shows positive associations with supply chain visibility
8.	Badakhshan et al., [106]	Exploring the potential of the supply chain digital twin framework to assist decision makers in managing inventory and cash flow through SCS	Empirical and Literature review	Result show that an upstream member of a Supply Chain plays a crucial role in mitigating the bullwhip effect and thus minimizing the cash conversion cycle of the SC
9.	Shukla & Tiwari, [107]	IT security management methods optimal management and timely allocation of resources go beyond the traditional. As such, It is an essential component of depending on defending against cybersecurity disruptions in the industry. 4.0 is the definition	Empirical and Literature review	Input parameters for workflow optimization skilled manpower, production time and capital allocation for hardware recovery

10. Grassi et al. [108]	The privacy plan for sensitive data is integrated into a blockchain-based broker. Special performance models are being developed for buyers and sellers	Emprical and literature review	Recent advances in Industry 4.0 production control archhitectures and blockchain technology mediation mechanism developed
11. Liu et al. [99]		A bibliometric analysis and theoretical	Bridging the gaps between the previous conceptual framework of sustainable supply chain management and the recently rapidly growing digital is an important issue
12. Chauhan et al., [109]	Examining Industry 4.0 technologies and sustainable SCM applications	Theoretical and Literature review	Limited emprical studies have been conducted for developing countries. A few studies focused on operational espects, economies and automation in SCM
13. Brinker & Haasis, [110]	The aim is to reveal the research gap regarding the effects of power asymmetrices in the supply chain in addition to the digitalization trend	Literature review	Digitalization can cause highlighted power asymmetries as it can change the competitive landscape and channel structures
14. Ali, [100]	Industry 4.0 and supply chain digitazation trends examined	Literature review	Digitalization industry 4.0 applications are used in supply chain management
15. Kankaanpaa, [111]	The abiliy of digital platforms to impact the supply chain the mediation effect of performance and supply chain capability was tested	Theoretical	Demonstrated that digital platforms have a positive and significant impact on supply chain performance
16. Zoric et al., [112]	Operation of the tradional food supply chain (FSC) in the wholesale and retail segment It aims to identify a set of measures and incentives for the digitalization of business processes and thier negative impact on sustainability	Theoretical and Literature	SC management should be committed to digitizing business processes as a priority for sustainability segment
17. Oubrahim et al.,[113]	Digitalization, supply chain suatinability and practices Supply chain integration on overall supply chain performance examined	Literature review	Decisions makers supply chains accurately, quickly and should make it more efficient

18. Deepu & Ravi, [114]	Digitalization SC and Communication technology tools are most important topic recent times	Literature review	Supply chain digitalization (SCD) in business processes and intercompany information systems (EIS) have become important in the modern industrial world
19. Tseng, et al., [115]	Sustainable supply chain management practices (SCPs), social environmental and economic perspectives are explored in the Indonesian coffee industry and Industry 4.0 technology	Theoretical and literature review	Digitalization integration has a positive interaction with working conditions supply chain finance
20. Kilay et al., [116]	Demonstrating that both e-payments and e-commerce have positive and impact service variables on the performance of micro, small and medium enterprises (MSME) supply chains in Indonesia	Literature review	Services variables related to the performance of MSME supply chains in Indonesia showing that both e-payments and e-commerce have positive and impact

9. DISCUSSION

The research emphasized in the literature studies conducted in 2022 that digitalization in human resources, accounting, entrepreneurship, and supply chain management increased even more with the covid 19 epidemic, and opportunities in entrepreneurship came to the fore. However, the problems and solution proposals brought by digitalization or non-digitalization should have been mentioned.

For example, despite the opportunities and advantages offered by technological revolutions to the business world, its impact on the service sector has yet to be discussed much (Navarrete et al., [117]).

At this point, the need for more studies on digital requirements and the lack of infrastructure of companies is remarkable. Another issue is that studies generally include literature reviews and theoretical studies. Analyzing digitalization processes during and after Covid-19 can provide significant benefits.

10. CONCLUSIONS

With the advancement and use of information technologies, which replaced traditional management structures, decision support systems that were renewed with these

technologies came to the fore (İraz, [118]). With the digitalization age, efficiency has increased in the management of world companies (Akmaeva et al. [11]). Companies that cannot compete in the digital age will undoubtedly fall victim to “Digital Darwinism” (Bansal et al., [119]). With digital technologies, companies use green process innovations, enabling them to increase their level of responsible digitalization when they use green packaging and recycled materials in their search for energy-efficient solutions (Cardinali & Giovanni, [13]). Therefore, digitalization supports green management and sustainable green goals. Digital technologies strongly influence the company’s business model. For many, digitization was perceived as a significant threat to employees’ jobs (Fedorova et al., [56]). In addition, the idea is that Industry 4.0 will reduce manual labor and that robots will work, or machines will make workers' work more accessible by reducing the workload. (Kanbur, [120])’s HRM, AI, and components of artificial intelligence Industry 4.0, which creates a systematic approach to digitalization, uses artificial intelligence in human resources. These subjects need to be researched more in Türkiye. According to (Alanlı, [67]), digitalization accelerates processes in public services and HRM processes and reduces costs. It has been

determined that it saves time and facilitates access to information. For this reason, it is essential to follow the digital developments in public institutions and provide the necessary equipment and specialization to use these tools.

The use of artificial because of the development of digitalization processes in all management areas provides less damage to the natural environment, and artificial intelligence and advanced technology will contribute to the workforce. There are few holistic studies on the digitalization of management in the literature. Conducting a qualitative and quantitative analysis of the digitalization trends of management units will make a significant contribution.

REFERENCES

- Hussain, N., Haque, Ul. A. & Baloch. A. Management Theories: The Contribution of Contemporary Management Theorists in Tackling Contemporary Management Challenges, Special Issue on Business and Organisation Research, Journal of Yaşar University, Pages, 156-169, 2019
- Atay, S., Ceylan, S., Teker, S. Ç., Keskin, H. & Tatoğlu, E. Çalışan Eğitiminde Dönüşüm: En İyi Uygulama Örneği Olarak Uzaktan Eğitim Kapısı, T.C. Cumhurbaşkanlığı İnsan Kaynakları Ofisi, 2023.
- Caputo, A., Pizzi, S., Pellegrinni, M. M. and Dabic, M. Digitalization And Business Models: Where are we Going? A Science Map of The Field, Journal of Business Research, Vol, 123, Pages, 489-501, 2021
- Agrawal, P. and Narain, R. Digital Supply Chain Management: An Overview, ICAAMM, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Pages, 455, 2018
- Möller, K., Schaffer, U., Verbeeten, F. Digitalization in Management Accounting and Control: An Editorial, Journal of Management Control, Vol, 31, Issue, 8-8, 2020
- Monge, C. E., Soriano, R. D. The Role of Digitalization in Business and Management: A Systematic Literature Review, Review of Managerial Science, 2023
- Imgrund, F., Fischer, M., Janiesch, C. And Winkelmann, A. Approaching Digitalization With Business Process Management, Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, March 06-09, Lüneburg, Germany, 2018
- O'Brien, Clodagh. What is Digital Transformation? A Guide for Business, Digital Marketing Institute.com Access Date, 02.06.2023. <https://digitalmarketinginstitute.com/blog/digital-transformation-business-guide>, 2022
- Chen, X., Eder, M. A., Shihavuddin, ASM., & Zheng D. A Human_Cyber-Physical System toward Intelligent Wind Turbine Operation and Maintenance, *Sustainability* 2021.
- Noble, M. S., Mende, M., Grewal, D., & Parasuraman, A. The Fifth Industrial Revolution: How Harmonious Human-Machine Collaboration is Triggering a Retail and Service (R) Evaluation, Journal of Retailing Vol, 98, Pages, 199-208. ScienceDirect, 2022
- Akmaeva, I. R., Aytpaeva, A. A., Glinchevskiy, I. E. & Zhautikov, B.. Development of Management in the Digital Era, Advances in Economics, Business and Management Research, International Conference on Economics, Management, and Technologies Volume 19, 2020
- Mende, M. & Noble, S. The Fifth Industrial Revolution: How Harmonious Human-Machine Collaboration is Triggering a Retail and Service ® Evolution Journal of Retailing, Vol, 98, 2019.
- Cardinali, G. P. & Giovanni, D. P. Responsible Digitalization Through Digital Technologies and Green Practices, Wiley, 2022
- Dülek, B. & Aydın, İ. Dijital Çağda Marka Yönetimi, 9. International Conference on Culture and Civilization Tashkent Chemical-Technological Institute, Uzbekistan, 2021
- Riofrio, S. M. A., Lupton, C. N. & Vasquez, R. G. J. Does Market Digitalization Always Benefit Firms? The Latin American Case? Management Decision Vol, 60, Issue, 7, Papers, 1905-1921. Emerald Publishing Limited, 2022
- Kaur, R., Singh, R., Gehlot, A, Priyadarsh, N & Twala, B. Marketing Strategies 4.0 Recent Trends and Technologies in Marketing, Sustainability, 2022

17. Hua, S. Disruption; Digitalization and Connectivity: Asia's Art Market in Transformation, *Arts Vol*, 11, Issue, 57, 2022
18. Man, Kim M., Yang, L. R. The Future Prospect of Digital Marketing in The Malaysian Context, *International Business Research*, Vol, 15 Issue, 1. Pages, 72, 2022
19. Mostaghel R., Oghazi, P., Parida, & Sohrabpour, V. Digitalization driven retail business model innovation: Evaluation of Past and Avenues for Future Research Trends, *Journal of Business Research*, Vol, 146, Pages, 134-145, 2022
20. Lanenko, M, Lanenko, M., Shevckhuk, E. Digital Transformation of Marketing Activities in Transport Systems Management During COVID-19: Experience, Problems, Prospects, *Transportation Research Procedia*, Vol, 63, 2022
21. Masrianto, A., Hartoyo, H., Hubeis, S. V. A., & Hasanah, N. H. Digital Marketing Utilization Index for Evaluating and Improving Company Digital Marketing Capability, *Journal of Open Innovation, MDPI*, Vol, 8, issue, 153, 2022
22. Qian, J., Lin, M. C. P., Law, R., & Li, X. Lack of IT and Digital Marketing Professionals in Hospitality: Is it Education's Fault? *Heliyon*, Vol, 8, 2022
23. Terho, H., Mero, J., Siutla, L., & Jaakkola, E. Digital Content Marketing in Business Markets: Activities, Consequences, And Contingencies Along the Costumer Journey, *Industrial Marketing Management*, Vol, 105, Pages, 294-310, 2022
24. Shankar, V., Grewal, D., Sunder, S., Fossen, B., Peters, K. & Agarwal, A. Digital Marketing Communication in Global Marketplaces: A review of Extant Research, Future Directions, And Potential Approaches, *International Journal of Research in Marketing*, Vol, 39, Pages, 541-565, 2022
25. Hagen, D., Risselada, A., Spierings, B., Weltevreden, J. W. J., Atzema, O. Digital Marketing Activities, by Dutch Place Management Partnerships: A Resource-Based view, *Cities*, Vol, 123, 2022
26. Setkute, J. & Dibb, S. 'Old boys club': Barriers to Digital Marketing in Small B2B Firms, *Industrial Marketing Management*, Vol, 102, 2022
27. Behera, K.J., Bala, K. P., Rana, P. N. & Kizgin, H. Cognitive Computing Based Ethical Principles for Improving Organisational Reputation: A B2B Digital Marketing Perspective, *Journal of Business Research Issue*, 141, Pages, 685-701, 2022
28. Barykin, S., Lavskaya, K., Baydukova, N., Kapustina, I., Kalinina, Naumova, E.& Dedyukhina, N. The Complexity of Digital Marketing Methodology Implementation in Air Passenger Transportation: The Case of Russia, *Transportation Research Procedia*, Vol, 63, Pages, 695-702, 2022
29. Keke, M. E. The Use of Digital Marketing in Information Transport in Social Media: The Example of Turkish Companies, *Transportation Research Procedia* Vol, 63, 2022
30. Lopes, R. A. Digital Content Marketing: Conceptual Review and Recommendations for Practitioners, *Academy of Strategic Management Journal*, Vol, 21, Issue 2, 2022
31. Purwanto, A. How Does the Role of Digital Marketing and Brand Image Affect Food Product Purchase Decisions? An Empirical Study on Indonesian SMEs in the Digital Era, *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, Vol, 3, Issue, 6, 2022
32. Amjad, T. Digital Entrepreneurial Marketing: A Bibliometric Analysis Reveals an Inescapable Need of Business Schools, *The International Journal of Management Education* Vol, 20, (2022).
33. Kerdpitak, C. The Effect of Innovative Management, Digital Marketing, Service Quality, And Supply Chain Management on Performance in Cultural Tourism Business, *Uncertain Supply Chain Management*, Vol, 10, Pages, 771-778, 2022
34. Kurdi, Al. B., Alshurideh M., Akour, I. Alzoubi, M. H., Obeidat, B. & Alhamad, A. The Role of Digital Marketing Channels on Costumer Buying Decisions Through eWOM in The Jordanian Markets, *International Journal of Data and Network Science*, Vol, 6, Pages, 1175-1185, 2022
35. Platov, A., Kalemulloev, M. & Zikirova, S. Management Accounting in the Context of Digitalization, *SHS Web of Conferences*, Vol, 106, Issue, 01037, 2021
36. Sabuncu, B. The Effects of Digital Transformation on the Accounting Profession, *Ömer Halis Demir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler*

- Fakültesi Dergisi, Vol, 15, Issue, 1, Pages, 103-115, 2022
37. Hasibuan, H. F. T., Meifari, V. & Muda, I. Management Control System Of Polytechnic of Health Ministry of Health Tanjungpinang With The Use of Digitalization Accounting As A Financial Management System, *Journal of Pharmaceutical Negative Results* Vol, 13 Issue, 7, 2022
38. Agostino, D., Saliterer, I. and Steccolini, I. Digitalization, Accounting, and Accountability: A Literature Review and Reflections on Future Research in Public Services, *Financial Accountability & Management*, Pages, 152-176, 2022
39. Şen, K. İ & Terzi, S. Suggestions on Accounting Education in Artificial Intelligence and Digital Accounting Trends, *Journal of Business in The Digital Age*, Vol, 5, Issue, 2, 2022
40. Jans, M., Aysolmaz, B., Corten, M., Joshi, A.& Peteghem, van M. Digitalization in Accounting- Warmly Embraced or Coldly Ignored? *Emerald Publishing*, Vol, 36, Issue, 9, 2022
41. Varaniute, V., Zickute, I.& Zandaraviciute, A. The Changing Role of Management Accounting in Product Development: Directions to Digitalization, Sustainability and Circularity, *Sustainability*, MDPI, 2022
42. Coman, M. D., Ionescu, A. C., Duica, A., Coman, D. M, Uzlau, C. M., Stanescu, G. S.& State, V. Digitization of Accounting: The Premise of The Paradigm Shift of Role of The Professional Accountant, *Applied Sciences*, 2022
43. Mutlu, D. M., Makey, A. B., Dalkılıç, E. Perceptions of Accounting Professionals Regarding Digitalization and Remote Work During the Covid-19 Pandemic, *Journal of Management and Economics Research*, Vol, 20, Issue, 4, Pages, 115-137, 2022
44. Awang, Y., Shuhidan, M. S., Taib, A., Rashid, N. & Hasan S. M. Digitalization of Accounting Profession: An Opportunity or A Risk for Future Accounts, *Proceedings, MDPI*, 2022
45. Güney, A. The Role of Digitalization in Accounting, *International Journal of Human Sciences*, Vol, 19, Issue, 2, 2022
46. Zhang, M., Ye, T. & Jia, L. Implications of The Momentum Theory of Digitalization in Accounting: Evidence from Ash Cloud, *Chine Journal of Accounting Research*, Vol, 15, 2022
47. Murodovich, R. G., & Ziyadullaevna, S. B. Prospects for Use of Digital Information Technologies in Accounting, *Global Research Network*, Vol, 3, Issue, 12, 2022
48. Taib, A., Awang, Y., Shuhidan, M. S., Rashid, N. & Hasan, S. M. Digitalization in Accounting: Technology Knowledge and Readiness of Future Accountants, *Universal Journal of Accounting and Finance*, Vol, 10, Issue, 1, Pages, 348-357, 2022
49. Awyong, A., Cheng, Q., Deng, T.& Wang, R. Digitization, Accounting Jobs and Financial Reporting Quality, *Singapur Management University*, 2022
50. Brabete, V. & Goagara, D. Digitalization A Danger to Accounting Professionals? *Journal of Corporate Governance, Insurance and Risk Management (JCGIRM)* Vol, 9, Issue, 1, 2022
51. Pham, H. Q & Vu, P. K. Digitalization in Small and Medium Enterprise: A Parsimonious Model of Digitalization of Accounting Information for Sustainable Innovation Ecosystem Value Generation, *Asia Pacific Journal of Innovation, and Entrepreneurship*, Vol, 16, Issue, 1, Emerald Publishing Limited, 2022
52. Yakut, Ş. M. Dijital Okuryazarlığın Muhasebe Meslek Mensuplarının Verimliliğe Etkilerinin Analizi, *Journal of Business Research*, Vol, 18, Issue, 1, Pages, 749-766, 2022
53. Mert, H., Güner, M. & Duyar, G. Dijitalleşme Sürecinin Gelişimi Ve Muhasebe Uygulamalarına Etkileri Yönünden İstanbul İlinde SMMM'ler Üzerinde Bir Araştırma, *Muhasebe ve Denetime Bakış*, Vol, 66, Sayfa, 195-218, 2022
54. Tekelioğlu, Z. Muhasebe Meslek Mensuplarının Dijitalleşme Algısı: Konya İli Örneği, *Karamanoğlu MehmetBey Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya*, 2022
55. Yalçın, H. Muhasebenin Dijitalleşmesi Ve Muhasebe Mesleğinin Geleceği, *Muhasebe-Pazarlama Organization: Teori Ve Uygulama*, (ed, Karabulut, Ş.), Ekin Yayınevi, 2022

56. Fedorova, A., Koropets, O. & Gatti, M. Digitalization of Human Resource Management Practices and Its Impact on Employees' Well Being, In Proceedings of the International Scientific Conference "Contemporary Issues in Business, Management, and Economics Engineering," Vilnius Papers, 740-749, 2019
57. Silva, D. L. B. P., Soltovski, R., Pontes, J., Treinta, F. T., Leitao, P., Mosconi, E., Resende, L.M.M.de & Yoshino, R. T. Human Resources Management 4.0: Literature Review and Trends, Computers & Industrial Engineering, Vol, 168, 2022
58. XingShu, G., & ZiXiang, Z. Analysis on Intelligent Management of Human Resources in Urban Community Under Normalized Epidemic Prevention And Control, Procedia Computer Science Vol, 199, Pages, 924-928, 2022
59. Zavyalova, Sokolov, D., Kucherov, D. & Lisovskaya, A. The digitalization of Human Resource Management: Present And Future, Foresight And STI Governance, Vol, 16, Issue, 2, 2022
60. Kodua, T. L., Xiao, Y., Adjei, O. N., Asante, D., Ofosu, O. B. & Amankona, D. Barriers to Green Human Resources Management (GHRM) Implementation in Developing Countries. Evidence from Ghana, Journal of Cleaner Production, Vol, 340, 2022
61. Kambur, E. Yapay Zekâ Çağında İnsan Kaynakları Yönetimi Konusunda Yazılmış Türkçe Makaleler Üzerine Bir Araştırma, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt, 48, Sayfa, 139-152, 2022
62. Oruçoğlu, O. Endüstri 4.0'ın İnsan Kaynakları Yönetimi Fonksiyonlarından İşe Alım'a Etkileri, Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi, Cilt 13, Sayı 1, Sayfa, 57-58, 2022
63. Murugesan, U., Subramanian, P., Srivastava, S. & Dwivedi, A. A Study of Artificial Intelligence Impacts on Human Resource Digitalization in Industry 4.0, Decision Analytics Journal Vol, 7 2022
64. Athira, S. Trends in Human Resource Management in the New Technological Era, East Asian Journal of Multidisciplinary Research (EAJMR), Vol 1, Issue 9, Pages, 1745-1756, 2022
65. Al Haziazi, Mohammed., Muthuraman, S., Yahyaei, Al, N. & Balushi, Al.A., Opportunities And Challenges in Digitalizing the HRM In Middle East, Webology, Vol. 19, Issue 2, 2022
66. Padhy, P., Dash, M. An Emerging Trend of Digitalization in HRM, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vol, 7, Issue, 8, 2022
67. Alanlı, A.. Kamu Sektöründe Dijitalleşmenin İnsan Kaynakları Yönetimine Etkisi; Mardin İlinde Nitel Bir Araştırma, Pesa International Journal of Social Studies Cilt 8, Sayı 3, 2022
68. Fenech, R. Human Resource Management in Digital Era Through the Lens of Next Generation Human Resource Managers, Journal of Management Information And Decision Sciences, Vol, 25 Issue 1, 2022
69. Cooke, L. F., Dickmann, M., & Parry, E. Building Sustainable Societies Through Human-Centred Human Resource Management: Emerging Issues and Research Opportunities, The International Journal of Human Resource Management, Vol, 33, Issue, 1, 2022
70. Şaşmaz, C. E. Dijital Dönüşüm Sürecinde İnsan Kaynakları Yönetimi, Sosyal, Beşeri ve İdari Bilimler Alanında Uluslararası Araştırmalar VIII, (Ed. Ateş, A.). Eğitim Yayınevi, 2022
71. Durmaz, V. & Burçak, İ. Yapay Zekâ İnsan Kaynakları Krizini Çözecek mi? Sosyal Beşeri Ve İdari Bilimler Alanında Uluslararası Araştırmalar IV, (ed, Kısa, M.). Eğitim Yayınevi, 2022
72. Kaçık, S. & Aykan, E. Toplum 5.0 Ve İnsan Kaynakları Yönetimi İlişkisi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Vol 9, Issue, 3, 2022
73. Sönmez, S. & Kalaycı, N. İnsan Kaynakları Yönetiminde Dönüşüm: İş Yerinden Bağımsız Çalışma Ve Dijitalleşme, Journal of Management Theory and Practices Research, Cilt, 3, Sayı, 2, 2022
74. Demirci, B., Atsan, M., Çetinkaya, S., Ögüt, A. E. Dijitalleşmenin İnsan Kaynakları Yönetimi Uygulamalarına Etkisi, Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, Vol, 5, Issue 1, Pages, 214-226, 2022
75. Giones, F. & Brem, A. Digital Technology Entrepreneurship: A Definition and Research Agenda, Technology Innovation Management Review, Vol, 7, Issue, 5, 2017

76. Rippa, P. & Secundo, G. Digital Academic Entrepreneurship: The Potential of Digital Technologies on Academic Entrepreneurship, *Technological Forecasting & Social Change*, 2018
77. Zhang, J., & Chen, Z. (2023). Exploring human Resource Management Digital Transformation in the Digital Age, *Journal of Knowledge Economy*,
78. Orrensalo, T. Candida. & Shahrokh N. Entrepreneurs' Information-Seeking Behaviors in the Digital Age—A Systematic Literature Review, *Journal of Small Business Management*, 2022
79. Chatterjee, S., Chaudhuri, R., Vrontis, D. & Thrassou, A. SME Entrepreneurship and Digitalization. The Potentialities And Moderating Role of Demographic Factors, *Technological Forecasting & Social Change*, Vol, 179. *Elsevier*, 2022
80. Bertoni, F., Bonini, S., Capizzi, V., Colombo, G. M. & Manigart, S. Digitization in the Market for Entrepreneurial Finance: Innovative Business Models and New Financing Channels, *Entrepreneurship Theory and Practice* Vol, 46 Issue, 5, Pages, 1120- 1135, 2022
81. Gallego, T. M., Srache, W., Sousa Jabbor, L. A. B. Digital Technologies And Green Human Resource Management: Capabilities for GSCM Adoption And Enhanced Performance, *International Journal of Production Economics*, Vol, 249, 2022
82. Ghazy, N., Ghoneim, H. & Lang, G. Entrepreneurship, Productivity, And Digitalization: Evidence From the EU, *Technology in Society*, Vol, 70, 2022
83. Fernandes, C., Ferreira, J. J., Veiga, M. P., Kraus, S. & Dabic, M. Digital Entrepreneurship Platforms: Mapping the Field and Looking Towards A Holistic Approach, *Technology in Society*, Vol, 70, 2022
84. Ratten, V. Digital Platforms and Transformational Entrepreneurship During The COVID-19 Crisis, *International Journal of Information Management*, 2022
85. Panagaria, A. Digital Revolution, Financial Infrastructure and Entrepreneurship: The Case of India, Asia, And Global Economy, Vol, 2, 2022
86. Dana, P. L., Salamzadeh, A., Hadizadeh, M., Heydari & Shamsoddin, S. Urban Entrepreneurship and Sustainable Businesses in Smart Cities; Exploring Digital Technologies, Sustainable Technology and Entrepreneurship, Vol, 1, 2022
87. Modgil, S., Dwivedi, K. Y., Rana, P. N., Gupta, S. & Kamble, S. Has Covid-19 Accelerated Opportunities for Digital Entrepreneurship? An Indian Perspective, *Technological Forecasting & Social Change* Vol, 172, 2022
88. Al-Mamary S. H. Y., & Alraja, M. M. Understanding Entrepreneurship Intention and Behavior in the Light of TPB Model from the Digital Entrepreneurship Perspective, *International Journal of Information Management Data Insights*, Vol, 2 (2022).
89. Himki, A., Ramadhan, T., Durachman, T., & Promano, S. E. P. Digital Business Entrepreneurship Decisions: An E-Business Analysis (A Study Literature Review), *Startupreneur Bisnis Digital (SABDA)*, Vol, 1, Issue, 1, 2022
90. Xu, G., Hou, G., & Zhang, J. Digital Sustainable Entrepreneurship: A Digital Capability Perspective Through Digital Innovation Orientation for Social and Environmental Value Creation, *Sustainability MDPI*, 2022
91. Baig, U., Hussain, M. B., Kavaliauskiene, M. L., & Davidavicius, S. Digital Entrepreneurship: Future Research Directions and Opportunities for New Business Model, *Sustainability MDPI*. 2022
92. Baranauskas, G., & Raisene, G. A. Transition to Digital Entrepreneurship with a Quest of Sustainability: Development of a New Conceptual Framework, *Sustainability*, Vol 14, Issue 1104, 2022
93. Sadigov, R. Impact of Digitalization on Entrepreneurship Development in The Context of Business Innovation Management, *Marketing i menedžment inovacij*, 2022
94. Schiuma, G. & Carlucci, D. The transformative Leadership Compass: Six Competencies for Digital Transformation Entrepreneurship, *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, Vol, 28, Issue, 5, 2022
95. Sedera, D., Tan, W. C. & Xu, D. Digital Business Transformation in Innovation and Entrepreneurship, *Information & Management*, Vol, 59, Issue 3, Elsevier, 2022
96. Tao, Z., Zhi, Z. & Shangun, L. Digital Economy, Entrepreneurship and High-Quality Economic

- Development: Empirical Evidence from Urban China, *Front. Econ. China*, Vol, 17, Issue, 1, 2022
97. Steinger, M. D., Brohman, K. M. & Block, H. J. Digital Entrepreneurship: What is New, if Anything? *Business & Information Systems Engineering*, Vol, 64, Pages, 1-14, 2022
98. Longo, F., Mirabelli, G., Padovano, A & Solina, V. The Digital Supply Chain Twin Paradigm for Enhancing Resilience and Sustainability Against COVID-like Crises, *Procedia Computer Science*, Vol, 217, Pages, 1940-1947, 2023
99. Liu, L., Song, W. & Liu, Y. Leveraging Digital Capabilities Toward a Circular Economy: Reinforcing Sustainable Supply Chain Management with Industry 4.0 Technologies, *Computers & Industrial Engineering*, 178, Published by Elsevier, 2023
100. Ali, B. S. Industrial Revolution 4.0 and Supply Chain Digitization, *South Asian Journal of Social Review*, Vol. 1 Issue 1, Pages, 21-41, 2022
101. Bigliardi, B., Filippelli, S., Petroni, A. & Tagliente, L. The Digitalization of Supply Chain: A Review, *Procedia Computer Science* Vol, 200, Pages, 1806-1815 Published by *Elsevier*, 2022
102. Selivanova, N., Borkovska, V., Mykytyuk, P., Holiachuk, N., Huz, M., & Zaitsev, O. Improving Accounting and Management of Settlements with Foreign Suppliers In The Context of Globalization on The Example of Agricultural Enterprise, *Journal of Agriculture And Crops*, Vol, 8, Issue, 3, Pages, 152-163, 2022
103. AlNasrallah, W., & Saleem, F. Determinants of the Digitalization of Accounting in an Emerging Market: The Roles of Organizational Support and Job Relevance, *Sustainability*, MDPI, Vol, 14, Pages, 6483, 2022
104. Burgess, P., Sunmola, F. & Heck, W. S. Blockchain Enabled Quality Management in Short Food Supply Chains, *Procedia Supply Chains*, Vol, 200, Pages, 904-913, 2022
105. Ye, F., Liu, K., Lai, H. K., Zhan, Y. & Kumar, A. Digital Supply Chain Management in the Covid-19 Crisis: An Asset Orchestration Perspective, *International Journal of Production Economics*, Vol, 245, 2022
106. Badakhshan, E., Ball, P., & Badakhshan, A. Using Digital Twins for Inventory and Cash Management in Supply Chains, *IFAC Papers Online Conference Paper Archive*, Vol, 55 Issue, 10, Pages, 1980.1985, 2022
107. Shukla, M. & Tiwari, M. Digital operations scheduling, workflow management, and performance measures of factors responsible for disruption in Industry 4.0 supply chain, *IFAC-PapersOnline*, Vol, 55, Issue, 10, Pages, 37-42, 2022
108. Grassi, A., Guizzi, G., Santillo, C. L., Vespoli, S. & Arlinghaus, C. J. On the Development of a Blockchain-Implementable Intermediation Model for Digital Supply Chain, *IFAC Papers Online Conference Paper Archive*, Vol, 55, Issue, 10, Pages, 946-951, 2022
109. Chauhan, S., Sing, R., Gehlot, A., Akram, V. S., Twala, B. & Priyadashi. Digitazlization of Supply Chain Management With Industry 4.0 Enabling Technologies: A Sustainable Perspective, *MDPI*, Vol 1, Issue, 11, 2022
110. Brinker, J. & Haasis, D. H. Power in the Context of SCM and Supply Chain Digitalization: An Overview from A Literature Review, *Logistics*, *MDPI*, 2022.
111. Kankaanpaa, H. T. The impact of digitalization on firm performance: Examining the Role of Digital Culture and the Effect of Supply Chain Capability, *Emerald Publishing* Vol, 28, Issue, 8, 90-109, 2022
112. Zoric, N., Maric, R., Maric, D. T. & Vukmirovic, G. The Importance of Digitalization for The Sustainability of The Food Supply Chain, *Sustainability*, 2022
113. Oubrahim, I., Qattrociochi, B., Sefiani, N. & Savastano, M. Assessing The Relationships Among Digitalization, Sustainability; SC Integration and Overall Supply Chain Performance: A Research Agenda, 14th International Conference of Logistics and Supply Chain Management, *LOGISTIQUA*, 2022 May, 25 -27 National School of Business and Management (ENCGJ), A. Chouaib Doukkali University, ELJADIDA – Morocco, 2022
114. Deepu, T. S. & Ravi, V. Modeling of Interrelationships Amongst Enterprise and Inter-Enterprise Information System Barriers Affecting Digitalization in Electronis Supply Chain, *Business Process Management Journal*, Vol, 28, Issue 1, 2022

115. Tseng, L. M., Bui, D. T., Lewi, S., Rizaldy, H. Lim, K. M., Wu, J. K. Causality Sustainable Supply Chain Management Practices in the Indonesian Coffe Industry Using Qualitative Infirmination: Digitalization Integration Leads Performance Improvement, International Journal of Logistics: Research and Applications, Taylor & Francis, 2022

116. Kilay, L. A., Simamora, H. B. & Putra, P. D. The Influence of E-Payment and E-Commerce Services on Supply Chain Performance: Implications of Open Innovation and Solutions for The Digitalization of Micro, Small and Medium Enterprises (MSMEs) in Indonesia, Journal of Open Innovation, MDPI, 2022

117. Navarrete, R. S., Carrubi, B. D. & Marques. The effect of digitalization on business performance: An applied study of KIBS, Journal of Business Research, Vol, 126, Pages, 319-326, 2021

118. İraz, R. Organizasyonlarda Karar Verme Ve İletişim Sürecinin Etkinliği Bakımından Bilgi Teknolojilerinin Rolü, Selçuk Üniversitesi, Karaman İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi, Karaman, Türkiye. Vol, 11, Pages, 407-422, 2004

119. Bansal, A., Panchal, T., Jabeen, F., Mangla, K. S.& Singh G. A Study of Human Resource Digital Transformation (HRDT): A Phenomenon of Innovation Capability Led by Digital and Individual Factors, Journal of Business Research, Pages 157, 2022

120. Kanbur, E. Yapay Zekâ Çağında İnsan Kaynakları Yönetimi Konusunda Yazılmış Türkçe Makaleler Üzerine Bir Araştırma, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt, 48, Sayfa, 139-152, 2022