



RECENT ADVANCES IN MECHATRONICS ENGINEERING - II

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİNDEKİ SON GELİŞMELER - II

EDITORS

Prof. Dr. Nihat AKKUS
Dr. Hakan BASARGAN



BIDGE Publications

RECENT ADVANCES IN MECHATRONICS ENGINEERING – II
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİNDEKİ SON GELİŞMELER- II

EDITORS: PROF. DR. NİHAT AKKUS, DR. HAKAN BASARGAN

ISBN: 978-625-372-826-7

1st Edition

Page Layout By: Gozde YUCEL

Publication Date: 13.10.2025

BIDGE Publications

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form or by any means, except for brief quotations for promotional purposes with proper source attribution, without the written permission of the publisher and the editor.

Certificate No: 71374

All rights reserved © BIDGE Publications

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara



Editörden

MEKON – Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Konferansı, ilk kez **2021 yılında** gerçekleştirilmiş, ikincisi ise dört yıl aradan sonra **2025 yılında** yeniden hayata geçirilmiştir. Bu konferans, sadece bir akademik etkinlik değil; aynı zamanda mühendislik öğrencilerinin **araştırma kültürüyle tanıştıkları bir okul** işlevi görmektedir.

MEKON'un temel amacı; başta **lisans son sınıf öğrencileri** olmak üzere, **yüksek lisans ve doktora düzeyindeki genç araştırmacılara**, bilimsel çalışmalarını raporlamayı, düzenli ve akademik bir biçimde anlatmayı ve en önemlisi **makale yazma becerisi kazanmayı öğretmektir**. Bilimsel üretimin ve paylaşımın ilk adımını atan bu platform, öğrencilerimizin akademiye ve Ar-Ge dünyasına geçişini kolaylaştırmakta; aynı zamanda özgüvenlerini geliştirmektedir.

MEKON 2025 kapsamında, toplam **41 bildiri** sunulmuş, konferansa **7 değerli davetli konuşmacı** katkı sağlamıştır. Sunulan bildiriler; robotik sistemler, otonom sürüş teknolojileri, endüstriyel otomasyon çözümleri, enerji sistemleri ve yapay zekâ tabanlı mühendislik uygulamaları gibi son derece güncel ve çok disiplinli alanları kapsamaktadır.

Bu yıl özellikle öne çıkan bir tema **yapay zekâ** olmuştur. Programda yer alan bildirilerin büyük bir bölümü doğrudan veya dolaylı olarak yapay zekâ, makine öğrenmesi ve görüntü işleme teknolojileriyle desteklenmiştir. Bu durum, genç mühendislerin teknolojiye olan ilgisinin ne kadar güncel ve vizyoner bir noktaya geldiğini açıkça göstermektedir.

Konferans boyunca sunulan projeler arasında; atık sınıflandırma sistemlerinden, afet yönetimi için drone'lara; işitme engellilere yönelik titreşimli müzik bantlarından, enerji verimli araçlara kadar birçok toplumsal ve çevresel katkı sağlayan örnek yer almıştır. Bu yönüyle MEKON, yalnızca akademik bir platform değil, aynı zamanda **sosyal sorumluluk ve mühendislik etiği** taşıyan bir vizyonun da taşıyıcısı olmuştur.

Bu kitabın, hem yeni çalışmalara ışık tutacağına hem de MEKON'a katılan öğrencilerimizin ilk akademik adımlarını belgeleyen bir kaynak olarak uzun yıllar değerlendirileceğine inanıyoruz. Bu yolculukta emeği geçen tüm öğrencilerimize, danışman akademisyenlere, hakem heyetine, değerli konuşmacılarımıza ve düzenleme kuruluna içten teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Yeni MEKON konferans'larında tekrar görüşmek dileğiyle...

Saygılarımla,

Prof. Dr. Nihat Akkuş

Konferans Başkanı & Kitap Editörü

MEKON 2025

From the Editor

The MEKON – Mechatronics Engineering Student Conference was first held in 2021, and after a four-year break, its second edition was brought to life again in 2025. This conference is not merely an academic event; it also serves as a school where engineering students are introduced to a culture of research.

The primary aim of MEKON is to teach young researchers—especially senior undergraduate students, as well as master’s and doctoral candidates—how to report their scientific work, present it in a structured and academic manner, and most importantly, to develop the essential skill of writing academic papers. This platform, which marks the first step in scientific production and dissemination, both facilitates our students’ transition into academia and the R&D world, and strengthens their self-confidence. Within MEKON 2025, a total of 41 papers were presented, and 7 distinguished invited speakers contributed to the conference.

The presented papers covered highly contemporary and multidisciplinary fields such as robotic systems, autonomous driving technologies, industrial automation solutions, energy systems, and AI-based engineering applications. This year, artificial intelligence emerged as a particularly prominent theme. A large portion of the papers featured in the program were directly or indirectly supported by artificial intelligence, machine learning, and image processing technologies. This clearly demonstrates how up-to-date and visionary young engineers’ interest in technology has become.

Among the projects presented throughout the conference were examples that provided social and environmental contributions, ranging from waste classification systems and drones for disaster management, to vibrating music bands designed for the hearing-impaired and energy-efficient vehicles. In this respect, MEKON has been not only an academic platform, but also a bearer of a vision rooted in social responsibility and engineering ethics.

We believe that this book will both shed light on new studies and serve for many years as a source that documents the first academic steps of the students participating in MEKON.

We extend our heartfelt thanks to all our students, advisor academics, the panel of reviewers, our distinguished speakers, and the organizing committee who contributed to this journey.

We look forward to meeting again at future MEKON conferences...

Respectfully,

Prof. Dr. Nihat Akkuş

Conference Chair - Editor

MEKON 2025

Editörden

MEKON'25 – Uluslararası Katılımlı Mekatronik Öğrenci Konferansı Bildiriler Kitabı'nı sizlerle buluşturmaktan büyük mutluluk duyuyorum. 26–27 Haziran 2025 tarihlerinde İstanbul Bilgi Üniversitesi ev sahipliğinde hibrit formatta gerçekleştirilen bu konferans, mekatronik mühendisliği alanında genç araştırmacılar, akademisyenler ve öğrencilerin bir araya geldiği verimli bir bilimsel platform olmuştur.

Konferans boyunca katılımcılar, yürütmekte oldukları çalışmaları uluslararası bir ortamda sunma ve tartışma fırsatı bulmuş; farklı bakış açılarıyla tanışarak akademik birikimlerini zenginleştirmişlerdir. Bu süreçte, titiz bir hakem değerlendirmesinden geçen bildiriler, bilimsel kalitenin korunmasına ve konferansın akademik değerinin yükselmesine katkı sağlamıştır.

Elinizdeki bu kitap, söz konusu bildirilerin bir araya getirilmesiyle hazırlanmış olup, mekatronik mühendisliği alanında güncel araştırmaları ve yenilikçi yaklaşımları yansıtan önemli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Bu vesileyle, konferansın düzenlenmesinde emeği geçen tüm kurul üyelerine, hakemlere, destek veren kurum ve kuruluşlara, ayrıca katkılarıyla bu kitabı değerli kılan tüm katılımcılara teşekkür ederim.

Kitabın, araştırmacılar ve öğrenciler için ilham verici ve faydalı bir başvuru kaynağı olmasını dilerim.

Saygılarımla,

Dr. Hakan Basargan

Düzenleme Kurulu Başkanı & Kitap Editörü

MEKON 2025

From the Editor

It is my great pleasure to present to you the Proceedings of MEKON'25 – International Mechatronics Student Conference. Held on June 26–27, 2025, in hybrid format at Istanbul Bilgi University, this conference has served as a productive scientific platform where young researchers, academics, and students came together to share knowledge and exchange ideas in the field of mechatronics engineering.

Throughout the conference, participants had the opportunity to present and discuss their research in an international environment, benefiting from diverse perspectives and enriching their academic experience. The submitted papers underwent a rigorous peer-review process, which ensured the preservation of academic quality and enhanced the scientific value of the event.

This volume brings together those contributions, reflecting current research trends and innovative approaches in mechatronics engineering, and aims to serve as a valuable reference for researchers and students alike.

I would like to take this opportunity to express my gratitude to the organizing and scientific committees, the reviewers, the supporting institutions, and all participants whose contributions have made this volume possible.

I sincerely hope that this book will serve as an inspiring and useful resource for the academic community.

Sincerely,

Dr. Hakan Basargan

Chairman of the Organizing Committee & Editor
MEKON 2025

MEKON 2025 Komitesi - Committee

MEKON 2025 Konferans Başkanı - Conference Chair

Prof. Dr. Nihat Akkuş

MEKON 2025 Konferans Başkan Yardımcısı - Conference Vice Chair

Dr. Öğr. Üyesi Yeşim Öniz

MEKON 2025 Düzenleme ve Yürütme Kurulu - Organizing and Executive Committee

Dr. Hakan Basargan

Abdullah Özver

Zekeriya Polat

Mekseliyna Tartan Akbal

MEKON 2025 Sekreteryası - Secretariat

Merve Çelikkol

Nergis Başak Bozoğlu

Halime Yiğit

MEKON 2025 Bilim Kurulu - Scientific Board of the MEKON 2025

Prof. Dr.	Ahmet Fenercioğlu	Dr. Öğr. Üyesi	Hasan Demir
Prof. Dr.	Ahmet Mert	Dr. Öğr. Üyesi	Hilal Doğanay Katı
Prof. Dr.	Aysel Ersoy	Dr. Öğr. Üyesi	İbrahim Kürşad Türkoğlu
Prof. Dr.	DurmuşKarayel	Dr. Öğr. Üyesi	İrem Şenyer Yapıcı
Prof. Dr.	Klaus Werner Schmidt	Dr. Öğr. Üyesi	Kemal Sarioğlu
Prof. Dr.	M. Caner Aküner	Dr. Öğr. Üyesi	Kürşat Tanrıver
Prof. Dr.	Mehmet Azmi Aktacir	Dr. Öğr. Üyesi	Mehmet Ekrem Çakmak
Prof. Dr.	Bülent Aktaş	Dr. Öğr. Üyesi	Merdan Özkahraman
Doç. Dr.	Ahmet Meram	Dr. Öğr. Üyesi	Merve Erkınay Özdemir
Doç. Dr.	Ali Can Kaya	Dr. Öğr. Üyesi	Mohammed Mansour
Doç. Dr.	Altuğ Karabey	Dr. Öğr. Üyesi	Murat Erhan Çimen
Doç. Dr.	Beyda Taşar	Dr. Öğr. Üyesi	Mustafa Kocakulak
Doç. Dr.	Erkin Dinçmen	Dr. Öğr. Üyesi	Mustafa Tümbek
Doç. Dr.	İlyas Kacar	Dr. Öğr. Üyesi	Mustafa Çağrı Kutlu
Doç. Dr.	Kasım Serbest	Dr. Öğr. Üyesi	Necati Vardar
Doç. Dr.	Kemal Furkan Sökmen	Dr. Öğr. Üyesi	Özgür Solmaz
Doç. Dr.	Mehmet Koç	Dr. Öğr. Üyesi	Yenal Aydın
Doç. Dr.	Mehmet Polat	Öğr. Gör.	Ezgi Başaran
Doç. Dr.	Muhammet Aydın	Öğr. Gör.	Mustafa Perçin
Doç. Dr.	Osman Ülker	Öğr. Gör.	Zeki Omaç
Doç. Dr.	Özlem Polat	Arş. Gör.	Abdullah Feyzi Keleş
Doç. Dr.	Serkan Güler	Arş. Gör.	Berkay Eren
Doç. Dr.	Tahsin Köroğlu	Arş. Gör.	Cenk Kılıç
Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Yıldız	Arş. Gör.	Doğu Manalı
Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Remzi Özcan	Arş. Gör.	Elanur Ekici
Dr. Öğr. Üyesi	Akif Karafıl	Arş. Gör.	Gülyeter Öztürk
Dr. Öğr. Üyesi	Arif Solmaz	Arş. Gör.	İbrahim Arslanoğlu
Dr. Öğr. Üyesi	Berin Özdalğıç	Arş. Gör.	Kubilay Han
Dr. Öğr. Üyesi	Çağrı Kaymak	Arş. Gör.	Onur Akgün
Dr. Öğr. Üyesi	Emre Demirci	Arş. Gör.	Ruken Daş
Dr. Öğr. Üyesi	Emre Kemer	Arş. Gör.	Sedat İn
Dr. Öğr. Üyesi	Eren Tosyalı	Arş. Gör.	Ahmet Kırnap
Dr. Öğr. Üyesi	Furkan Dündar	Arş. Gör.	Egemen Belge
Dr. Öğr. Üyesi	Hamdullah Merdane		

Mekatronik Mühendisleri Derneği Akademik Kurulu
The Academic Board of the Association of Mechatronics Engineers

Prof. Dr.	Nihat Akkuş	Dr. Öğr. Üyesi	Mehmet Polat
Prof. Dr.	Ahmet Fenercioğlu	Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Burak Tatar
Prof. Dr.	Durmuş Karayel	Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Yıldız
Prof. Dr.	Haydar Livatyalı	Dr. Öğr. Üyesi	Muhammet Aydın
Prof. Dr.	M. Caner Aküner	Dr. Öğr. Üyesi	Yenal Aydın
Prof. Dr.	Mehmet Akar	Dr. Öğr. Üyesi	Kürşat Tanrıver
Prof. Dr.	Raif Bayır	Dr. Öğr. Üyesi	Hakan Çelik
Prof. Dr.	Savaş Dilibal	Dr. Öğr. Üyesi	Arif Solmaz
Prof. Dr.	Şahin Yıldırım	Dr. Öğr. Üyesi	Büşra Ceyhan
Prof. Dr.	Şeniz Ertuğrul	Dr. Öğr. Üyesi	Gülçin Özevci Çelebi
Prof. Dr.	Ayşegül Uçar	Dr. Öğr. Üyesi	İlknur Melis Durası
Prof. Dr.	Oğuz Yakut	Dr. Öğr. Üyesi	Armağan Özkaya
Prof. Dr.	İsmail Cem Parmaksızoğlu	Dr. Öğr. Üyesi	Ebru Günister
Prof. Dr.	Şükrü Alp Baray	Dr. Öğr. Üyesi	Meliha Pınar Sipahi
Doç. Dr.	Asaf Tolga Ülgen	Dr. Öğr. Üyesi	Cüneyt Ertal
Doç. Dr.	Bekir Aksoy	Dr. Öğr. Üyesi	Kemal Sarıoğlu
Doç. Dr.	Erkin Dinçmen	Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Yıldız
Doç. Dr.	Gökhan Atalı	Dr. Öğr. Üyesi	Alper Özpınar
Doç. Dr.	Gökhan Gelen	Dr. Öğr. Üyesi	Altuğ Karabey
Doç. Dr.	Kasım Serbest	Dr. Öğr. Üyesi	Arif Solmaz
Doç. Dr.	Mehmet Hakan Demir	Dr. Öğr. Üyesi	Berin Özdalğç
Doç. Dr.	Merve Erkınay Özdemir	Dr. Öğr. Üyesi	Cansu Noberi
Doç. Dr.	Özlem Polat	Dr. Öğr. Üyesi	Cemil Közkurt
Doç. Dr.	Sabri Bıçakçı	Dr. Öğr. Üyesi	Engin Ayçiçek
Doç. Dr.	Serkan Güler	Dr. Öğr. Üyesi	Hamdullah Merdane
Doç. Dr.	Tahsin Köroğlu	Dr. Öğr. Üyesi	Hilal Doğanay Katı
Doç. Dr.	Beyda Taşar	Dr. Öğr. Üyesi	Kenan Şentürk
Doç. Dr.	Murat Polat	Dr. Öğr. Üyesi	Kürşat Tanrıver
Doç. Dr.	Evren Çağlarer	Dr. Öğr. Üyesi	Mehmet Emin Aktan
Dr. Öğr. Üyesi	Yeşim Öniz	Dr. Öğr. Üyesi	Merdan Özkahraman
Dr. Öğr. Üyesi	Furkan Dündar	Dr. Öğr. Üyesi	Merve Teke Budaklı
Dr. Öğr. Üyesi	Mehmet Ayaz	Dr. Öğr. Üyesi	Mine Ak
Dr. Öğr. Üyesi	Ahmet Gültekin	Dr. Öğr. Üyesi	Mücahit Soyaslan
Dr. Öğr. Üyesi	Erdal Tunçer	Dr. Öğr. Üyesi	Nurettin Gökhan Adar
Dr. Öğr. Üyesi	Nurullah Hulki Tanrıyar	Dr. Öğr. Üyesi	Osman Ülkir
Dr. Öğr. Üyesi	Mehmet Erman Çalışkan	Dr. Öğr. Üyesi	Yenal Aydın
Dr. Öğr. Üyesi	Gülten Sadullahoğlu	Öğr. Gör. Dr.	Süleyman Çeven
Dr. Öğr. Üyesi	Berin Özdalğç	Dr.	Ruken Daş
Dr. Öğr. Üyesi	Koray Altıntaş	Arş. Gör. Dr.	Sefa Furkan Küçükoğlu
Dr. Öğr. Üyesi	Abdurrahman Eray Baran	Öğr. Gör.	Ezgi Başaran
Dr. Öğr. Üyesi	İbrahim Başar Aka	Arş. Gör.	Devrim Tümer
Dr. Öğr. Üyesi	Alper Kadir Tanyıldızı	Arş. Gör.	Sedat İn
Dr. Öğr. Üyesi	Çağrı Kaymak		

Destekleyen Kuruluşlar - Supporters



Mekatronik Mühendisleri Derneği Hakkında

Mekatronik Mühendisleri Derneği, 01 Mart 2016 tarihinde kurulan, 09 Mart 2016'da tüzüğü onaylanan; Mekatronik Mühendisleri ve Mekatronik ile alakalı ilk ve tek dernektir. Türkiye'deki **Mekatronik teknolojisini geliştirmeyi hedefleyen**, bu teknolojiyi **Türkiye sanayisine entegre etmeyi isteyen**, Mekatronik Mühendislerinin, teknisyenlerinin, teknikerlerinin ve Mekatronik teknolojisi ile ilgilenen tüm çalışanların/öğrencilerin **hakkını savunmayı amaçlayan** Mekatronik Mühendisleri Derneği, 9 kurucu yönetim kurulu üyesi tarafından kurulmuştur. **Yönetim kurulu içerisinde öğrenciler, Profesör akademisyenler ve şirket sahibi Mekatronik Mühendisi bulunmaktadır.**

Mekatronik Mühendisleri'nin yetkinliklerinin bulunduğu fakat yetkilerinin olmadığı alanlarda da **söz sahibi olabilmesi**, kendi içerisinde **örgütlenmesi** için **Mekatronik Mühendisleri Odası** kurmak amacına da sahip olan bu dernek, kurumsal firmaları veya öğrenci, mühendis, tekniker, teknisyenleri üye olarak bünyesine alabilmektedir.

About the Association of Mechatronics Engineers

The Association of Mechatronics Engineers was established on March 1, 2016, and its charter was approved on March 9, 2016. It is the first and only association dedicated to Mechatronics Engineers and mechatronics-related fields. Aiming to advance mechatronics technology in Türkiye, integrate this technology into Turkish industry, and protect the rights of mechatronics engineers, technicians, technologists, as well as all employees and students interested in mechatronics technology, the Association was founded by nine founding board members. The board includes students, professors, and company-owning mechatronics engineers.

The Association also pursues the goal of establishing a **Chamber of Mechatronics Engineers**, so that mechatronics engineers can have a say in fields where they possess competence but lack formal authority, and to strengthen organization within the profession. The Association accepts corporate firms, students, engineers, technologists, and technicians as members.

Recent Advances in Mechatronics Engineering II

Prof. Dr. Nihat Akkuş
Dr. Hakan Basargan

İÇİNDEKİLER - CONTENTS

Designing A Music-Vibration Band for Deaf Individuals: Feel The Music.....	1
Implementing Monte Carlo Tree Search for Adaptive Traffic Light Control: A SUMO-Based Study....	5
Real-Time Noise Reduction and Outlier Detection in Servo Motor Encoder Signals Using Kalman Filter-Based Signal Processing Algorithm.....	9
Compact Product Design for Maintaining Beverages/Foods Hot or Cold for a Specified Duration in Desktop Applications.....	4
Design and Prototype Development of an Adaptive Hair Dryer to Prevent Hair Damage.....	4
Solar-Assisted Electric Vehicle Topologies: A Comparative Analysis.....	4
STM32 Tabanlı Sensörsüz BLDC Motor Sürücü Tasarım ve Uygulaması.....	4
Radyo Frekans Saldırılarında Araç Kiti Güvenliği.....	8
Dinamik Raf Sistemli Servis Robotu.....	11
Enkaz Altı Mikro Kurtarma Kolu Tasarımı (EMOK).....	15
Hava Araçları için Katlanabilir Anten Tasarımı.....	19
Endüstriyel Otomasyon Sistemleri için Çoklu Haberleşme Protokollerini Destekleyen Gömülü Kontrol Kartı Tasarımı.....	24
Çelik Yüzeylerinde Oluşan Üretimsel Arızalarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tespiti.....	28
Dişli Kutu Arızalarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tespiti.....	32
Tehlikeli Yaya Davranışlarının Değerlendirilmesi İçin Bir Metrik Önerisi.....	63
Girişimcilik Ağı: Çok Katmanlı Dijital Girişimcilik Ağı Platformu Tasarımı ve Uygulama Modeli....	67
Kitap Taşıma Robotlarında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanik Performansın Değerlendirilmesi..	71
PV Destekli 7.4 kW Ev Tipi Hibrit Elektrikli Araç Şarj İstasyonunun Elektronik Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.....	75
Bobinli Silah Tasarımı ve Uygulaması: Elektromanyetik Fırlatma Sistemine Yönelik Bir Yaklaşım...	80
PID Kontrollü, Topoloji Optimizasyonlu ve Görüntü İşlemeli Otonom Arama Kurtarma Dronu.....	84
Arama Kurtarma Çalışmaları İçin Tasarlanmış Örümcek Robotun Optimize Edilmiş Tasarımı.....	89
İnşaat Sektöründe Çalışan İşçilerin İş Güvenliğini Artırmaya Yönelik Bir Bileklik Geliştirilmesi.....	93
Değiştirilebilir Platformlu Rover Araç.....	96
Görüntü İşleme Tabanlı Geri Dönüştürülebilir Atık Sınıflandırma Sistemi.....	100
Pres Uygulamaları İçin Akıllı Çubuk Mekanizması Tasarımı.....	104
Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü İşleme ile Otonom Görev Yürüten Su Altı Aracının Geliştirilmesi	109
Elektrotermal Mikroaktüatörde Boşluk Geometrisinin FEM ile Termomekanik Modellemesi ve Analizi.....	113

Designing A Music-Vibration Band for Deaf Individuals: Feel The Music

Sude Erva Apak, Özkan Karabacak

Kadir Has University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechatronics Engineering, Istanbul, Türkiye

ABSTRACT

This study introduces a wearable vibrotactile system aimed at enhancing music perception for Deaf and hard-of-hearing individuals by converting symbolic musical data into real-time tactile feedback. The system extracts pitch, rhythm, and intensity from MIDI files, maps them to four spatially distributed vibration motors via an Arduino-based platform, and wirelessly delivers commands using Bluetooth. A custom Python interface ensures low-latency signal processing and interactive user control. Informal user tests with both hearing and non-hearing participants confirmed the system's capacity to convey musical structure and dynamics through touch. This work contributes to the field of inclusive design and demonstrates the potential of mechatronic systems to bridge sensory accessibility gaps in musical experiences.

Keywords: Vibrotactile Feedback, Wearable Haptics, Music Accessibility, Deaf Individuals, MIDI Processing.

I. INTRODUCTION

Music is a powerful medium for emotional, cultural, and social connection. However, for Deaf and hard-of-hearing individuals, the absence of auditory access poses a significant barrier to fully engaging with musical experiences. This gap has prompted research into alternative sensory channels particularly the sense of touch to reinterpret music through vibration.

Early explorations, such as Hugo Gernsback's Physiophone (1920) [1], demonstrated that tactile feedback could convey basic rhythmic patterns. While these foundational ideas were valuable, modern efforts have struggled to balance accuracy, wearability, and emotional expression. Current systems are often either too bulky, prohibitively expensive, or fail to deliver the nuance required for immersive musical perception.

In response, the "Feel the Music" project proposes a compact, low-cost vibrotactile wristband that transforms symbolic musical data into real-time tactile feedback. The system focuses on MIDI files, which provide structured musical information including pitch, intensity, and timing. By extracting these features and translating them into frequency, PWM intensity, and motor location, the system enables users to experience music through spatially distributed vibrations on the wrist.

Developed using a Python-based control interface and an Arduino-powered actuator system, this project aligns with inclusive design goals. It demonstrates how mechatronic systems can enable multisensory engagement with music. The following sections describe the theoretical basis, design methodology, and results from system testing, establishing the feasibility and potential of vibrotactile music interpretation.

II. PREVIOUS WORK

Previous studies have demonstrated that vibrotactile systems can successfully convey musical rhythm, structure, and emotional nuance through haptic stimuli. Nanayakkara et al.

(2012) [2] and Enriquez et al. (2020) [3] explored multi-sensory setups combining haptic chairs and VR systems to enhance music engagement for Deaf individuals. More recent work by Zhao et al. (2023) [4] highlights the role of spatial actuator placement, rhythmic clarity, and adaptive intensity in improving tactile music experiences. These findings informed us of the spatial motor mapping and PWM scaling strategies adopted in this project.

III. SYSTEM DESIGN AND METHODOLOGY

This section outlines the design rationale, software implementation, and hardware structure used to realize the Feel the Music system. The methods prioritize low latency, spatial feedback clarity, and user comfort all aligned with accessibility and reproducibility goals.

III.1. Software Design

Python was selected for its rich ecosystem supporting MIDI parsing, serial communication, and GUI creation. The Mido library was used to extract musical data (pitch, velocity, duration) from MIDI files, which allows for precise and structured mapping of musical events without the need for real-time audio processing. MIDI was chosen over raw audio due to its deterministic structure, enabling easier synchronization and debugging.

Each musical parameter is mapped as follows:

Pitch → Motor assignment (spatial location)

Velocity → PWM intensity (vibration strength)

Duration → Actuation time in seconds

A Tkinter-based GUI provides a user-friendly interface for MIDI file selection, playback initiation, and real-time status updates. The system sends vibration instructions in the form of encoded strings via the Python serial library to the Arduino Nano through a Bluetooth (HC-05) connection.

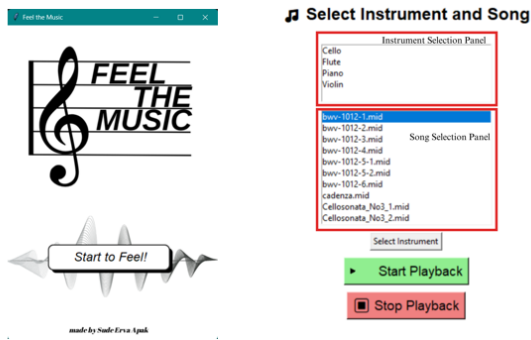


Figure 2: Song Selection and Start up Screen.

Each command string follows the format: motorID, frequency, PWM, duration, allowing the Arduino to interpret and actuate the vibration motors.

III.2. Hardware Design

The system's core is the Arduino Nano, chosen for its compact form and compatibility with standard motor control libraries. Four ERM vibration motors are placed around the wrist, each driven by two L298N Mini motor drivers. These drivers were selected for cost-effectiveness and availability, despite their limitations in advanced waveform modulation. Power is supplied by a 3.7V 1100mAh Li-Po battery, boosted to 5V via an MT3608 converter. The battery is safely rechargeable using a TP4056 module. The HC-05 module ensures reliable serial Bluetooth communication.

Table 1: Component-Function Table.

Component	Justification
Arduino Nano	Compact, reliable, widely supported
HC-05 Bluetooth	Simple UART serial, low-latency wireless control
L298N Drivers	Affordable, handles 2 motors per board
4 ERM Motors	Provide spatial vibration feedback
Li-Po + MT3608	Portable, sufficient for 10+ minutes of use
TP4056	USB charging with over-voltage protection

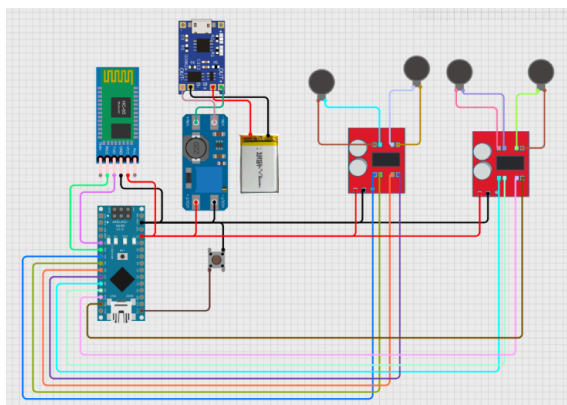


Figure 3: Circuit schematic of the wearable vibrotactile system.

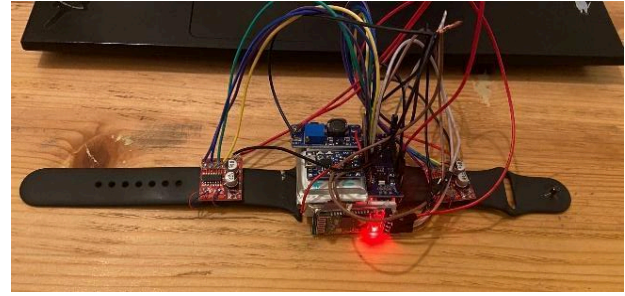


Figure 4: Vibrotactile Bracelet.

III.3. System Flow

The system operates in five clear stages:

MIDI Input: MIDI file is selected by user

Data Extraction: Notes parsed with pitch, velocity, and timing

Mapping: Each note is mapped to motorID, PWM, duration, frequency

Transmission: Command string sent via Bluetooth to Arduino

Actuation: Arduino activates motors according to mapped values

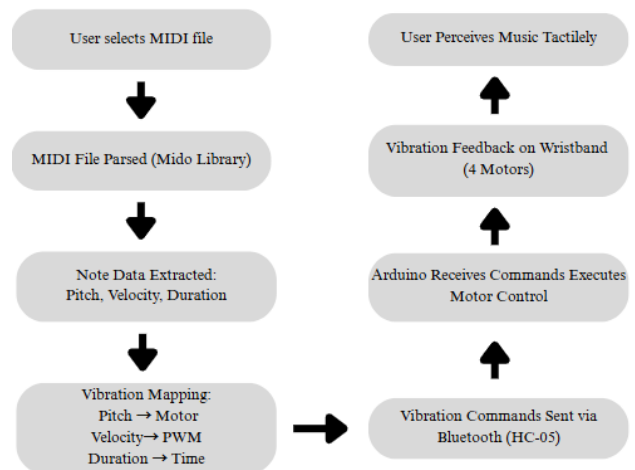


Figure 5: System Flow.

This modular architecture ensures clear division of responsibilities across hardware and software, enabling reproducibility and extensibility. Code and system diagrams can be shared for replication in future research.

IV. DISCUSSION

The results of this project demonstrate the feasibility of using a wearable vibrotactile device to convey musical information to Deaf and hard-of-hearing individuals. Through both technical validation and preliminary user testing, the system showed strengths in mapping musical parameters (pitch, rhythm, intensity) to tactile outputs. However, the development process also revealed areas for improvement in both hardware fidelity and future extensibility.

The use of MIDI input was a deliberate methodological choice. MIDI offers structured, easily parsed data without the computational overhead of real-time audio analysis. While this design simplifies development and supports rapid

prototyping, it limits applicability to live music environments. Incorporating audio feature extraction algorithms (e.g., onset detection, FFT, tempo estimation) would enable real-time performance compatibility.

Hardware limitations were most apparent in the motor driver selection. The L298N Mini drivers provided basic PWM control but lacked waveform programmability. For richer and more expressive tactile output, future iterations should consider haptic-specific ICs such as the DRV2605L from Texas Instruments. These allow playback of pre-programmed vibration effects, including ramps and pulses, which can convey more complex musical textures.

Power consumption was another observed challenge. Continuous multi-motor activation leads to rapid battery drain. Improved energy efficiency could be achieved by optimizing the vibration patterns or using lower-power drivers. Additionally, adaptive intensity scaling based on musical importance (e.g., downplaying background notes) may help conserve power.

From a usability perspective, the system's spatial mapping of pitch zones to wrist locations was reported as intuitive by test users. The PWM scaling strategy effectively conveyed dynamic changes in musical intensity. However, some participants noted that rapid rhythmic sequences became harder to distinguish—a limitation possibly linked to motor response time and tactile resolution of the skin.

Ergonomically, while the wearable was lightweight and safe, improvements could include using a flexible PCB and textile-integrated enclosures for enhanced comfort and aesthetics. Participants wearing the wristband for extended sessions suggested that softer materials and improved weight distribution would enhance long-term usability.

In summary, this discussion confirms the system's success in meeting core design goals—low-latency, modular, and perceptually meaningful music-to-vibration conversion—while also identifying key directions for future refinement in hardware expressivity, energy efficiency, and multimodal feedback integration.

V. RESULTS

The system was tested with a variety of MIDI files and through structured user evaluation. Results were assessed based on latency, mapping accuracy, vibration fidelity, and perceptual clarity.

V.1 System Performance Tests

Latency: Measured <100 ms between note detection and vibration response.

Pitch Mapping: Correctly assigned to motors M1–M4 as defined by pitch zones.

PWM Scaling: Vibration strength scaled with note velocity.

Chord Representation: Multi-motor activation supported for simultaneous note playback.

Table 2: Sample Mapping Results.

Note Range	Motor	Frequency (Hz)	PWM (Avg)
36–39	M1	~70	80
40–54	M2	~100	120
55–69	M3	~150	180
70+	M4	~200	220

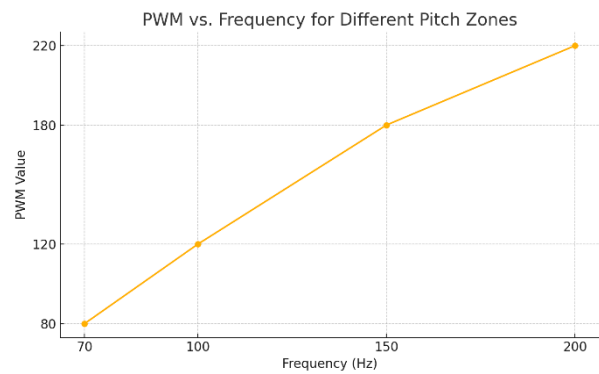


Figure 6: PWM-Frequency Chart.

V.2 User Evaluation

A pilot usability study was conducted with 6 participants (3 hearing, 3 Deaf) aged 18–32. Each participant interacted with 3 different MIDI samples representing distinct rhythmic and melodic characteristics.

Test Procedure:

Users wore the wristband and listened or felt three music clips.

After each clip, they answered 3 Likert-scale questions:

I could feel the difference between soft and loud notes.

I could detect the beat or rhythm through vibrations.

The vibrations were comfortable and easy to understand.

Summary Results (Avg. Rating 1–5):

Table 3: Summary Results.

Question	Avg. Score
Rhythm Perception	4.5
Intensity Differentiation (Soft vs Loud)	4.3
Overall Comfort & Interpretability	4.2

Observations:

All participants could distinguish strong and weak beats.

Deaf users found spatial location of motors helpful in perceiving pitch zones.

No discomfort or irritation was reported during 10-minute sessions.

These findings validate the system's effectiveness in conveying musical rhythm and dynamics through vibrotactile feedback.

VI. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This study presents a functional, low-cost, and user-centered vibrotactile system designed to enhance music perception for Deaf and hard-of-hearing individuals. By mapping structured musical information from MIDI files to spatially distributed vibration outputs on the wrist, the project successfully demonstrates how real-time tactile feedback can render music perceivable through touch.

Compared to earlier works using haptic furniture or visual-tactile VR environments, this system offers a compact, wearable, and mobile solution. Its contribution lies in its combination of accurate pitch mapping, dynamic PWM-based intensity scaling, and spatial motor distribution achieved using accessible components and open-source tools.

Preliminary user testing confirmed the system's ability to convey rhythm and dynamics effectively. Participants could distinguish pitch zones and intensity levels, validating the perceptual relevance of the mapping strategy. The feedback also highlighted areas for ergonomic and expressive improvement, guiding future iterations.

Future development will focus on:

Supporting real-time audio input using feature extraction techniques

Integrating DRV2605L drivers for programmable vibration effects

Employing machine learning to personalize haptic feedback profiles

Redesigning the hardware with flexible PCBs and textile enclosures

Developing a mobile application for untethered use in education, therapy, and live performance

In conclusion, "Feel the Music" contributes a reproducible, scalable, and inclusive framework that bridges sensory barriers in musical engagement. It affirms the potential of vibrotactile systems to expand access to music and enrich the cultural experiences of non-hearing users.

V. REFERENCES

- [1] Gernsback, H. (1920). The Physiophone: Music for the Deaf. *University of Minnesota Press*, 1(1), 1–5.
- [2] Nanayakkara, S., Wyse, L., Ong, S. H., & Taylor, E. (2012). Enhancing musical experience for the hearing-impaired using visual and haptic displays. *Human-Computer Interaction*, 28(2), 115–160. <https://doi.org/10.1080/07370024.2012.656072>
- [3] Enriquez, K., Palacios, M., Pallo, D., & Guerrero Idrovo, G. (2020). Sense: Sensory component VR application for hearing impaired people to enhance the music experience. *Proceedings of the 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.23919/CISTI49556.2020.9141112>
- [4] Zhao, K., Zhang, L., Wei, C., & Liu, Y. (2023). Wearable haptics for inclusive music experience: A systematic review. *Sensors*, 23(7), 3451. <https://doi.org/10.3390/s23073451>

Implementing Monte Carlo Tree Search for Adaptive Traffic Light Control: A SUMO-Based Study

Fatih Kaya, Pınar Kırıcı

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

ABSTRACT

Traffic congestion is a pervasive global challenge, leading to significant economic losses, environmental degradation, and reduced quality of life. Traditional traffic signal control (TSC) strategies, such as fixed-time and basic actuated systems, often fail to adapt effectively to dynamic and complex urban traffic conditions. This paper addresses an adaptive approach to traffic signal control by developing and implementing a prototype system based on Monte Carlo Tree Search (MCTS). Utilizing the Simulation of Urban MObility (SUMO) environment integrated via the Traffic Control Interface (TraCI), the proposed MCTS controller aims to optimize signal timings by intelligently exploring potential future traffic scenarios. The core components of the MCTS framework, including state representation, action selection and reward function are tailored for the traffic control domain. This study focuses on demonstrating the feasibility and operational principles of an MCTS-based controller for a single intersection. Preliminary observations from the SUMO simulation indicate the prototype's capability to make adaptive decisions in response to fluctuating traffic demands.

Keywords: Monte Carlo Tree Search, Traffic Signal Control, Sumo, Adaptive Control, Intelligent Transportation Systems.

I. INTRODUCTION

Urban traffic congestion presents a significant impediment to the efficiency and sustainability of modern cities, manifesting in substantial economic losses, environmental degradation, and a diminished quality of life [1]. Conventional Traffic Signal Control (TSC) strategies, including fixed-time and basic actuated systems, often lack the adaptability required to effectively manage the fluctuating and complex dynamics of urban traffic [2]. Fixed-time controllers, which operate on pre-set schedules, cannot respond to real-time variations in traffic demand. Meanwhile, actuated systems, while responsive to detected vehicles, typically optimize on a local basis and can be ineffective at network-level coordination or mitigating sustained congestion [3, 4].

Addressing these limitations necessitates the development of intelligent and adaptive traffic management systems. Among these, Monte Carlo Tree Search (MCTS), a powerful heuristic search algorithm adopted for complex decision-making under uncertainty, emerges as a particularly promising approach [5, 6]. MCTS adeptly balances the exploration of novel strategies with the exploitation of proven ones through simulation-based planning. This characteristic makes it highly suitable for the dynamic TSC problem, as it does not require a perfect analytical model of traffic behavior [7].

The primary objective of this work is therefore to present a clear and functional proof-of-concept for an MCTS-based traffic signal controller within the widely-used Simulation of Urban Mobility (SUMO) environment. To achieve this, SUMO is utilized to provide a realistic microscopic traffic simulation platform for developing and testing advanced TSC algorithms [8]. The proposed MCTS controller interfaces with SUMO via the Traffic Control Interface (TraCI), allowing it to perceive the current traffic state (primarily queue lengths and signal phase) and execute signal phase changes dynamically. The goal is to showcase the feasibility of this MCTS-SUMO integration and observe

the prototype's adaptive behavior at a single intersection under varying traffic conditions.

The content of this study includes the presentation of a functional MCTS-SUMO prototype for traffic signal control and empirical observations of its adaptive decision-making capabilities within the SUMO environment. This prototype serves as a foundational step for future research into more complex scenarios, scalability to networked intersections, and rigorous comparative performance evaluations. The remainder of this paper is organized as follows: Section II reviews related work, Section III details the proposed MCTS methodology and its SUMO integration, Section IV describes the experimental setup and discusses observations from the prototype.

II. RELATED WORK

TSC methods, such as fixed-time or basic actuated systems, often exhibit limitations in adapting to dynamic urban traffic conditions, leading to inefficiencies [9, 10]. While various adaptive strategies and Reinforcement Learning (RL) approaches have been explored to address these issues [11], MCTS presents a compelling alternative for online planning and decision-making in complex environments like traffic signal control [12].

MCTS is a heuristic search algorithm that balances exploration and exploitation by building a search tree based on simulated outcomes. Its ability to perform online planning using a generative model or simulator makes it particularly suitable for TSC, where future traffic states can be projected [13]. For traffic signal control, MCTS typically involves defining states based on current traffic conditions (e.g., queue lengths), actions as signal phase selections, and rewards based on performance metrics like delay or throughput, often evaluated through short-term simulations [14].

The integration of MCTS with microscopic traffic simulators like SUMO has been a key enabler for research in this area [8, 9, 14]. SUMO, coupled with its TraCI, allows an MCTS agent to perceive the simulated traffic

environment, execute signal control actions, and evaluate their impact in real-time. Studies such as [13] have demonstrated the use of MCTS with SUMO for optimizing signal timings at isolated intersections, showing its potential to outperform traditional policies by "foreseeing" traffic flow changes through simulation. Other research has also explored MCTS for adaptive signal control, sometimes in hybrid configurations [15] or focusing on specific aspects like mixed traffic flows [16].

This current study builds upon these foundations by focusing on the practical implementation and demonstration of a clear MCTS-based prototype for adaptive traffic signal control at a single intersection within the SUMO environment. While the broader literature explores complex MCTS variants and extensive comparative analyses [6], this work aims to provide a foundational demonstration of the MCTS-SUMO synergy and its adaptive capabilities in response to dynamic traffic, highlighting a straightforward application of MCTS principles.

III. METHODOLOGY

This section outlines the methodology for the MCTS based adaptive traffic signal controller, developed and implemented within the SUMO environment. The system enables dynamic signal phase adjustments based on real-time simulated traffic data.

III.1. System Overview

The core of the system is an MCTS agent designed to select the optimal subsequent traffic signal phase for an isolated intersection at discrete time intervals. The MCTS algorithm evaluates potential future traffic states resulting from different signal phase choices by conducting numerous short-term simulations (rollouts) within SUMO. A reward function, aimed at minimizing congestion, guides the MCTS search. A Python-based MCTS controller communicates with SUMO via the TraCI to retrieve state information and execute control actions.

SUMO [17] was utilized as the microscopic traffic simulation platform. TraCI facilitated the real-time interaction, enabling the MCTS controller to query traffic states (e.g., queue lengths, current signal phase), implement signal phase changes, advance the simulation, and crucially, save/load simulation states for the MCTS rollout mechanism.

III.2. MCTS Framework Components

The MCTS algorithm iteratively builds a search tree through four main steps: selection, expansion, simulation, and backpropagation. Key components were defined as follows: State Representation: The states provided to the MCTS comprised two elements: the index of the currently active traffic signal phase and a tuple representing queue lengths (number of halting vehicles) on predefined approach lanes. This data was obtained from SUMO via TraCI.

Action Space: The MCTS agent's actions were defined as selecting one of the main green signal phases available at the intersection (e.g., choosing between Phase 0 or Phase 2 for a typical four-phase light).

Reward Function: The reward function R is formulated to quantify the efficacy of an action by measuring its immediate impact on traffic congestion. It is defined as the

negative sum of all halting vehicles ($q_i(t)$) on monitored approach lanes ($i \in L$), accumulated over the entire rollout duration (T_r). This is formally expressed as:

$$R = - \sum_{t=1}^{T_r} \sum_{i \in L} q_i(t)$$

where, less negative reward signifies a more desirable outcome.

MCTS Search and Rollout: At each decision point, the MCTS performed a fixed number of iterations. The Selection step navigates the tree using the UCT (Upper Confidence bounds applied to Trees) policy by choosing the action a that maximizes the expression

$\frac{V(s,a)}{N(s,a)} + C\sqrt{\frac{\ln N(s)}{N(s,a)}}$, where V is the total reward for a node, $N(s)$ is the parent node's visit count, $N(s,a)$ is the child node's visit count, and C is the exploration constant. Expansion involved adding new child nodes for untried actions. The Simulation phase was critical: for each explored action sequence, SUMO's state was saved, the action (new signal phase) was applied, SUMO was run for a short duration, the resulting reward was calculated, and SUMO's state was restored. This allowed for independent evaluation of different decision paths. Finally, Backpropagation updated the visit counts and accumulated rewards of nodes in the tree.

III.3. Control Loop Integration

The MCTS controller operated in a loop synchronized with SUMO's simulation time. At predefined intervals, the current traffic state was retrieved from SUMO. This state formed the root for a new MCTS search. After completing the allocated iterations, the best action (next signal phase), typically the most visited child of the root, was selected and implemented in SUMO via TraCI. The simulation then proceeded until the next decision point.

This methodology facilitates an adaptive traffic signal management system where decisions are informed by simulated projections of near-future traffic conditions.

IV. EXPERIMENTAL SETUP & RESULTS

The experiments utilized on SUMO (Version 1.22.0) as the microscopic traffic simulation platform, with a Python-based MCTS controller interacting via the TraCI. The scenario involved a single isolated four-way intersection, identified as net.xml network file, which is described in Figure 1, equipped with a traffic light system. The MCTS controller's action space was configured to choose between the two main conflicting green phases (e.g., Phase 0 and Phase 2) of this traffic light. Queue lengths were monitored on the primary approach lanes to this intersection.

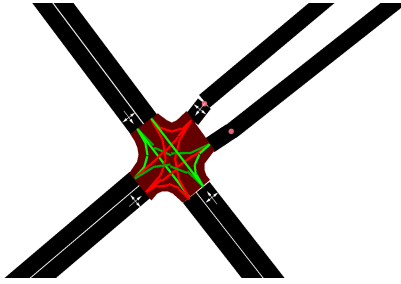


Figure 1: Traffic Light Intersection Network

IV.1. Observed Adaptive Control and Decision-Making

The MCTS controller, making decisions at 20-second intervals, exhibited adaptive phase switching in response to detected queue formations. Figure 2 illustrates the temporal dynamics of queue lengths on the monitored approach lanes, showing how MCTS-triggered phase changes aimed to alleviate detected congestion. For instance, a notable increase in queue length on a specific approach often preceded an MCTS decision to switch to a phase presumably serving that approach, leading to a subsequent queue reduction.

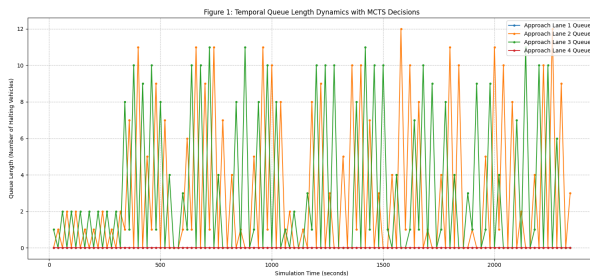


Figure 2: Temporal Queue Length Dynamics with MCTS Decisions

The decision-making process is further detailed in Table 1, which provides the specific rationale behind the queue dynamics visualized in Figure 2. A clearer example of this cause-and-effect cycle occurs around the 250 seconds mark, where a prominent peak for Approach 3 (the green line in Figure 2) is visible. The table documents the controller's response at simulation steps, as an illustration, at the third row the queue is (0,0,2,0), the MCTS evaluation projected that switching to Phase 2 would yield a superior reward (-3.50) compared to remaining in Phase 0 (-9.00). Notably, the agent's confidence in this choice is also reflected in the MCTS statistics, where the more promising action (Phase 2) received more "visits" during the search process. The subsequent drop in that same queue, seen immediately after in the graph, is the direct result of this data-driven action. This same logic, prioritizing the action with the most favorable reward projection, is consistently applied at each decision interval shown in the table. This repeated cycle, where a rising queue prompts a calculated phase switch to service the congestion, is responsible for the adaptive behavior observed throughout the simulation. Accordingly, this process highlights the practical strength of the MCTS framework as its ability to translate raw state data into a forward-looking, simulation-based evaluation to make informed, quantitative decisions rather than relying on fixed rules.

Table 1: MCTS Decision Snapshots

Previous Phase	Queues	MCTS Stats	Child	Chosen Phase
0 at Time: 0.0 s	0,0,1,0	Action 2: Visits=2, Reward= -2.50, Action 0: Visits=1, Reward= -5.00	2	2
2 at Time: 20.0 s	0,1,0,0	Action 0: Visits=2, Reward= -3.50, Action 2: Visits=1, Reward= -5.00	0	0
0 at Time: 40.0 s	0,0,2,0	Action 2: Visits=2, Reward= -3.50, Action 0: Visits=1, Reward= -9.00	2	2

IV.2. Interpretation and Limitations of Prototype Behavior

The observed adaptive behavior, responsive to dominant queues, confirms the MCTS mechanism's potential even with minimal search parameters. These parameters signify a very shallow search and a myopic (3-second) projection of consequences, making decisions primarily reactive to immediate, strong congestion signals. This aligns with expectations for an MCTS agent with a severely restricted computational budget but successfully demonstrates the core principle of using simulation-based projections for dynamic action selection. The interplay between Figure 2 and Table 1 underscores this reactive adaptiveness. Additionally, Figure 3 provides a SUMO GUI snapshot during a congested state.

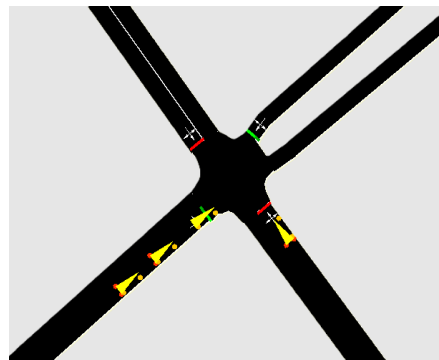


Figure 3: SUMO Intersection Visualization at a Congested State

The operational results confirm the fundamental feasibility of integrating MCTS with SUMO for adaptive TSC. However, for a scientific contribution beyond this proof-of-concept, the limitations are clear: the superficial search, the focus on an isolated intersection with simplified demand, a rudimentary reward function, and the lack of a comparative baseline. Despite these constraints, this work validates the MCTS-SUMO framework's operational principles and offers a foundation for future research

focusing on scaling the MCTS search, refining its components, and conducting comprehensive performance evaluations in more complex scenarios.

V. REFERENCES

- [1] Xu, S., Sun, C., & Liu, N. (2024). Road congestion and air pollution: Analysis of spatial and temporal congestion effects. *Science of The Total Environment*, 945, 173896. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173896>
- [2] Li, Jiangchen & Peng, Liquan & Hou, Kaizhe & Tian, Yong & Ma, Yulin & Xu, Shucai & Qiu, Tony. (2023). Adaptive Signal Control and Coordination for Urban Traffic Control in Connected Vehicle Environment: A Review. *Digital Transportation and Safety*. 2. 1-23. 10.48130/DTS-2023-0008.
- [3] Michailidis, P., Michailidis, I., Lazaridis, C. R., & Kosmatopoulos, E. (2025). Traffic Signal Control via Reinforcement Learning: A Review on Applications and Innovations. *Infrastructures*, 10(5),114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050114>
- [4] Lidbe, Abhay & Tedla, Elsa & Hainen, Alexander & Jones, Steven. (2017). Analytical Techniques for Evaluating the Implementation of Adaptive Traffic Signal Control Systems. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. 143. 04017011. 10.1061/JTEPBS.0000034.
- [5] Novikov, Artem & Yanovskyi, Volodymyr. (2024). Analysis of the decision-making algorithm efficiency in complex game environments on the example of Pac-Man. *Information Technology and Computer Engineering*. 21. 108-118. 10.63341/vitce/3.2024.108.
- [6] Browne, Cameron & Powley, Edward & Whitehouse, Daniel & Lucas, Simon & Cowling, Peter & Rohlfshagen, Philipp & Tavener, Stephen & Perez Liebana, Diego & Samothrakis, Spyridon & Colton, Simon. (2012). A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 4:1. 1-43. 10.1109/TCIAIG.2012.2186810.
- [7] Kemmerling, M., Lütticke, D., & Schmitt, R. H. (2023). Beyond games: A systematic review of neural Monte Carlo tree search applications. *Applied Intelligence*, 53(5), 4567–4582. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-05240-w>
- [8] Dobrilko, Olga & Bublil, Alon. (2024). Leveraging SUMO for Real-World Traffic Optimization: A Comprehensive Approach. *SUMO Conference Proceedings*. 5. 179-194. 10.52825/scp.v5i.1120.
- [9] Sun, Y., & Qi, H. (2024). A dynamic traffic signal scheduling system based on improved greedy algorithm. *PLOS ONE*, 19(3), e0298417. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298417>
- [10] Shepherd, S.P. (1992) A Review of Traffic Signal Control. Working Paper. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK. White Rose Research Online. Retrieved May 29, 2025, from <https://eprints.whiterose.ac.uk/2217>
- [11] Zhao, Y., & Tian, Z. Z. (2012). An overview of the usage of adaptive signal control system in the United States of America. *Applied Mechanics and Materials*, 178–181, 2591–2595. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.178-181.2591>
- [12] Smirnov, Ilia & Sanner, Scott & Abdulhai, Baher. (2023). A Case for Monte Carlo Tree Search in Adaptive Traffic Signal Control: Modifiability, Interpretability and Generalization. 1480-1486. 10.1109/ITSC57777.2023.10422214
- [13] Abdullah, M. (2021). Signal optimization via heuristic search and traffic simulation (Master's thesis, University of Alberta). ERA - University of Alberta <https://doi.org/10.7939/r3-0saj-mm45>
- [14] Zhang, Y., & Wang, J. (2023). Monte-Carlo tree search for behavior planning in autonomous driving. *arXiv preprint arXiv:2310.12075*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.12075>
- [15] Erişkin, Ekinhan & Terzi, Serdal & Ceylan, Halim. (2022). Development of Dynamic Traffic Signal Control Based on Monte Carlo Simulation Approach. *Measurement*. 188. 110591. 10.1016/j.measurement.2021.110591.
- [16] Cheng, Yanqiu & Hu, Xianbiao & Tang, Qing & Qi, Hongsheng & Yang, Hong. (2020). A Monte Carlo Tree Search-Based Mixed Traffic Flow Control Algorithm for Arterial Intersection. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2674. 10.1177/0361198120919746.
- [17] Alvarez Lopez, P., Banse, A., Barthauer, M., Behrisch, M., Couéraud, B., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Nippold, R., & Wagner, P. (2025). SUMO (1.23.1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15359663>

Real-Time Noise Reduction and Outlier Detection in Servo Motor Encoder Signals Using Kalman Filter-Based Signal Processing Algorithm

Oğuz Emre Solmaz, Umut Çalışgan, Hasan Serdar

Necmettin Erbakan University Seydişehir Ahmet Cengiz Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Konya, Türkiye

ABSTRACT

This study presents a Kalman filter-based real-time signal processing algorithm designed to address noise, mechanical vibrations, and pulse dropouts in servo motor encoder signals. The developed system integrates outlier detection, noise reduction, and velocity estimation functions for encoder signal processing. The algorithm was tested on encoder signals with 1000 pulse/rev resolution, and stability analysis was performed under various noise conditions. Experimental results demonstrate that the developed algorithm achieves an average position error of 0.059692 radians and perfect outlier detection performance with 100% success rate. Frequency response analysis shows that the system has a -3dB cutoff frequency of approximately 7.9 Hz, making it suitable for high-precision servo motor control applications.

Keywords: Servo Motor, Encoder, Kalman Filter, Signal Processing, Outlier Detection.

I. INTRODUCTION

The accuracy of position feedback in servo motor control systems directly affects the overall system performance. Encoder signals are subject to various noise sources including mechanical vibrations, electromagnetic interference, quantization errors, and pulse dropouts. This situation causes degradation in controller performance, particularly in applications requiring high precision [1].

Modern industrial applications demand increasingly precise servo motor control, with positioning accuracies often required in the sub-millimeter range [2]. In such systems, even minor disturbances in encoder signals can lead to significant tracking errors, overshoot, and instability. High-resolution encoders, while providing better theoretical accuracy, are paradoxically more susceptible to noise due to their increased sensitivity to environmental disturbances.

The challenges in encoder signal processing are multifaceted. Mechanical vibrations from motor operation, coupling systems, and external sources introduce periodic and random noise components [3]. Electromagnetic interference from power electronics, switching devices, and nearby equipment can corrupt digital pulse trains. Quantization errors inherent in the analog-to-digital conversion process create systematic distortions [4]. Additionally, pulse dropouts due to contamination, misalignment, or electrical faults can cause sudden position jumps that traditional filters cannot distinguish from legitimate rapid movements.

Traditional filtering methods may perceive sudden changes in encoder signals as outliers and lose actual motion information. Low-pass filters, while effective at noise reduction, introduce phase lag that can destabilize control loops. Moving average filters suffer from similar limitations and cannot adapt to varying noise characteristics. Median filters, though robust to impulse noise, may smooth out legitimate high-frequency motion components [5].

Recent advances in adaptive filtering have shown promise, but many existing approaches lack the computational

efficiency required for real-time implementation in embedded servo controller [6]. Furthermore, most conventional methods treat noise reduction and outlier detection as separate problems, leading to suboptimal overall performance.

Therefore, there is a need for signal processing algorithms that can operate in real-time, have adaptive features, and perform outlier detection. Kalman filters demonstrate strong performance in state estimation and noise reduction, providing a suitable solution for servo motor applications [7]. The Kalman filter's recursive nature makes it computationally efficient for real-time implementation, while its statistical foundation allows for optimal fusion of predictions and measurements [8], [9].

The integration of outlier detection with Kalman filtering presents unique opportunities [10]. By identifying and correcting erroneous measurements before they enter the filter, the overall system robustness can be significantly improved. This approach maintains the filter's optimality while preventing contamination from outliers that could otherwise bias state estimates for extended periods.

In this study, a Kalman filter-based algorithm has been developed for real-time processing of encoder signals. The algorithm simultaneously estimates position and velocity information, performs outlier detection, and operates stably under different noise conditions. The system incorporates a median-based outlier detection mechanism that operates in conjunction with the Kalman filter to provide robust state estimation even in the presence of significant disturbances.

The primary contributions of this work include: a unified framework combining Kalman filtering with outlier detection specifically designed for encoder signals, comprehensive performance analysis across varying noise conditions and system parameters, frequency domain characterization of the filtering system, and practical implementation guidelines for industrial servo motor applications.

II. MATERIALS AND METHODS

The developed signal processing system consists of three main components: servo encoder simulator, Kalman filter-based signal processor, and outlier detection module. The simulator generates encoder signals with 1000 pulse/rev resolution and adds noise, vibration, and pulse dropouts to model real conditions.

The Kalman filter estimates position and velocity information using a two-state system model. The state vector is defined as:

$$\mathbf{x} = [\text{position velocity}]^T \quad (1)$$

with state transition matrix:

$$\mathbf{F} = [1 \ \Delta t \ 0 \ 1] \quad (2)$$

and measurement matrix:

$$\mathbf{H} = [1 \ 0] \quad (3)$$

Process noise covariance matrix $\mathbf{Q}$ and measurement noise covariance $\mathbf{R}$ are adjusted according to system dynamics.

A median-based approach is adopted for outlier detection. Using the median and standard deviation values of the last five measurements, it is determined whether the current measurement is an outlier. For detected outliers, the signal is corrected using Kalman filter prediction values.

II.1. Kalman Filter Design

The Kalman filter operates in two phases. In the prediction phase, current state estimation is made using previous state information. In the update phase, optimal state estimation is obtained by combining measurement information with prediction information.

The prediction phase equations are as follows: the state prediction:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (4)$$

and covariance prediction:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}_{k-1|k-1} \cdot \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (5)$$

The update phase includes innovation calculation:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \quad (6)$$

innovation covariance:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k|k-1} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (7)$$

Kalman gain:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}_k^{-1} \quad (8)$$

state update:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{y}_k \quad (9)$$

and covariance update:

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (10)$$

The algorithm processes each encoder measurement in real-time, first checking for outliers, then applying Kalman filtering to obtain filtered position and velocity estimates. The system maintains a sliding window of recent measurements for outlier detection and memory management.

The detection of outliers is based on a statistical rule using the median and standard deviation of recent measurements. A measurement $\mathbf{z}_k$ is flagged as an outlier if it satisfies the condition:

$$\mathbf{z}_k - \text{median}(\mathbf{z}_{k-5:k-1}) > \alpha \cdot \text{std}(\mathbf{z}_{k-5:k-1}) \quad (11)$$

Where $\text{median}(\mathbf{z}_{k-5:k-1})$ is the median of the last five measurements, σ is their standard deviation, α is a predefined threshold (typically 2 or 3).

When a measurement is identified as an outlier, it is replaced with the predicted observation:

$$\mathbf{z}_k \leftarrow \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \quad (12)$$

This corrected measurement is then used in the Kalman update phase to ensure robustness against noise and signal artifacts.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

Comprehensive testing was performed to evaluate the algorithm's performance under various conditions. Basic filtering tests were conducted using sinusoidal reference signals with different noise levels. As demonstrated in Figure 1, the system achieved excellent tracking performance with a mean position error of 0.059692 radians and mean velocity error of 1.958191 rad/s. The figure clearly shows the filtered position and velocity signals closely following the reference trajectory.

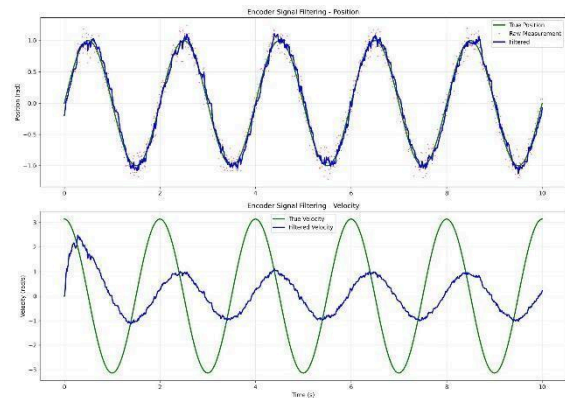


Figure 1: Encoder signal filtering Position and Velocity

Stability analysis was conducted across six different noise levels to evaluate system robustness. The results presented

in Figure 2 show that the algorithm maintained stable operation across all tested conditions. The lowest noise condition yielded an error of 0.073440 radians while the highest noise condition produced an error of 0.338678 radians. The linear performance degradation pattern indicates excellent algorithm stability characteristics.

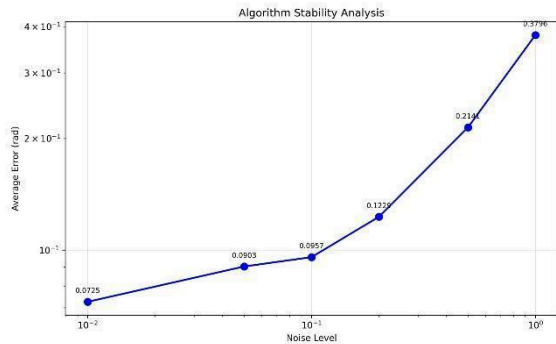


Figure 2: Algorithm Stability Analysis

Frequency response analysis revealed the system's filtering characteristics across the test range of 0.1 to 100 Hz. The Bode plot shown in Figure 3 illustrates the measured -3dB cutoff frequency of approximately 7.9 Hz, demonstrating the system's ability to suppress high-frequency noise while maintaining adequate bandwidth for servo control applications.

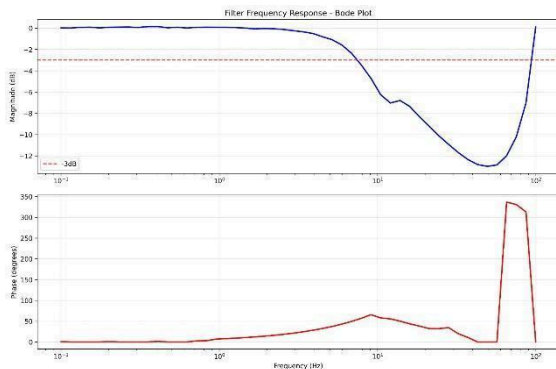


Figure 3: Filter Frequency Response – Bode Plot

Outlier detection testing with artificially injected disturbances showed exceptional performance. Figure 4 presents the outlier detection results, where the system detected a total of 235 outliers during testing and achieved perfect detection performance with 100% success rate for artificially introduced outliers. This demonstrates the robustness of the median-based outlier detection algorithm.

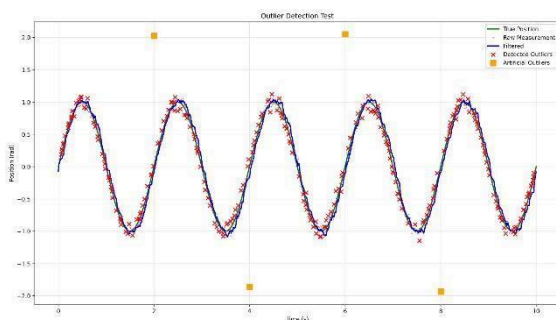


Figure 4: Outlier Detection Test

Parameter optimization studies were conducted to identify optimal operating parameters. The error map presented in Figure 5 reveals that an outlier threshold of 3.5 and measurement noise covariance of 0.1 provided optimal performance, resulting in a minimum position error of 0.079687 radians. The color-coded visualization clearly shows the parameter sensitivity across the tested range.

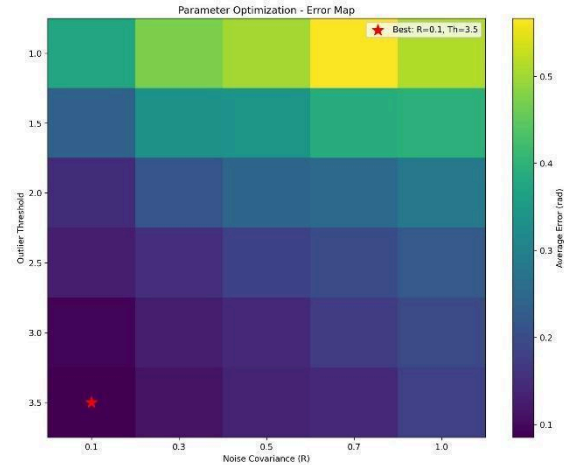


Figure 5: Parameter Optimization – Error Map

The comprehensive performance evaluation results are summarized in Table 1, which presents the key metrics obtained from the experimental testing. The table consolidates the quantitative performance indicators including tracking accuracy, outlier detection effectiveness, and optimal operating parameters identified through systematic testing. These results demonstrate the algorithm's capability to meet the stringent requirements of industrial servo motor control applications while maintaining computational efficiency suitable for real-time implementation.

Table 1: Performance Summary

Performance Metric	Value
Mean Position Error	0.059692 rad
Mean Velocity Error	1.958191 rad/s
Outlier Detection Rate	100.0%
Total Outliers Detected	235
Optimal Threshold	3.5
Optimal Noise Covariance	0.1
Minimum Error	0.079687 rad
-3dB Cutoff Frequency	7.9Hz

III.1. Practical Implementation Consideration

Real-time hardware implementation of the proposed algorithm presents several practical challenges that must be addressed for successful deployment in industrial servo systems. The computational complexity of the Kalman filter operations, particularly matrix inversions and multiplications, requires careful consideration of processing capabilities in embedded controllers. Memory requirements for maintaining the sliding window of measurements and covariance matrices must be balanced against available RAM in typical servo drive architectures. The algorithm's recursive nature provides advantages in this regard, as it does not require storage of historical data beyond the outlier detection window. Processing latency is critical in servo

applications where control loop timing directly affects stability margins. The algorithm's sequential processing structure allows for pipelined implementation, where prediction and update phases can be overlapped with data acquisition cycles. Typical implementation on modern ARM Cortex-M processors achieves execution times under 50 microseconds per cycle. Temperature variations and electromagnetic interference in industrial environments may affect the optimal parameter settings identified in laboratory conditions. Adaptive parameter adjustment mechanisms could enhance robustness, though this would increase computational overhead.

IV. CONCLUSIONS

This research successfully developed and validated a Kalman filter-based signal processing algorithm for servo motor encoder applications. The system demonstrates superior performance in noise reduction and outlier detection with real-time operation capability. Key achievements include a position tracking accuracy of 0.059692 radians, perfect outlier detection with 100% success rate, and stable operation across varying noise conditions. The frequency response characteristics with a 7.9 Hz cutoff frequency make the system suitable for typical servo motor control applications requiring effective noise suppression. The parameter optimization results provide practical guidance for implementation, with an optimal outlier threshold of 3.5 and noise covariance of 0.1. The algorithm's excellent stability characteristics, demonstrated by graceful performance degradation from 0.073440 to 0.338678 radians across the tested noise range, confirm its suitability for industrial applications. Future work will focus on adaptive parameter adjustment based on operating conditions and extension to multi-axis servo systems. The algorithm's modular design facilitates integration into existing servo control architectures with minimal modification.

V. REFERENCES

- [1] Vaseghi, S. V. (2008). Advanced digital signal processing and noise reduction. John Wiley & Sons.
- [2] Pahk, H. J., Lee, D. S., & Park, J. H. (2001). Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(1), 51-63.
- [3] Bagri, I., Tahiry, K., Hraiba, A., Touil, A., & Mousrij, A. (2024). Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review. *Vibration*, 7(4), 1013-1062.
- [4] Mizutani, K., & Harada, H. (2022). Quantization noise reduction by digital signal processing-assisted analog-to-digital converter for in-band full-duplex systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(8), 6643-6655.
- [5] Kaynardag, K., Yang, C., & Salamone, S. (2025). An impulsive noise filter for rail vibration measurements using a laser Doppler vibrometer on a moving platform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111918.
- [6] Liu, J., Qiao, B., Zhang, X., Yan, R., & Chen, X. (2019). Adaptive vibration control on electrohydraulic shaking table system with an expanded frequency range: theory analysis and experimental study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, 122-137.
- [7] Fisch, A. T., Eckley, I. A., & Fearnhead, P. (2021). Innovative and additive outlier robust Kalman filtering with a robust particle filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 70, 47-56.
- [8] Ma, H., Yan, L., Xia, Y., & Fu, M. (2020). *Kalman filtering and information fusion*. Springer Singapore.
- [9] Lai, X., Yang, T., Wang, Z., & Chen, P. (2019). IoT implementation of Kalman filter to improve accuracy of air quality monitoring and prediction. *Applied Sciences*, 9(9), 1831.
- [10] Zhang, L., Liu, X., Zong, G., & Wang, W. (2025). Kalman filter-based SMC for systems with noise and disturbances: applications to magnetic levitation system. *International Journal of Systems Science*, 1-13.

Compact Product Design for Maintaining Beverages/Foods Hot or Cold for a Specified Duration in Desktop Applications

Cansu Arkun, Kemal Sarioğlu

Istanbul Health And Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department Of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkiye

ABSTRACT

In this study, the aim is to design and prototype a compact device for desktop use that leverages the heating and cooling capabilities of thermoelectric modules. Previous studies in the literature have demonstrated coolers or heaters operating based on the Peltier effect; however, there is a lack of practical desktop products that can perform both heating and cooling functions. This study seeks to develop a single device capable of both heating and cooling. When not in operation, the device is intended to serve as an aesthetically pleasing decorative item on the desktop. Upon completion of the design and prototyping phases, a patent application will be pursued. The project includes an examination of thermoelectric principles and the Peltier effect, supported by relevant case studies. This research aims to introduce an innovative approach to the more efficient and practical integration of thermoelectric technologies into everyday life.

Keywords: Peltier Heating/Cooling, Peltier Prototype, Thermoelectricity

I. INTRODUCTION

The aim of this study is to design a prototype capable of heating or cooling beverages and foods for a specified duration using a thermoelectric module, and to conduct thermal electric analysis of the prototype. Based on these analyses, the operating conditions of the designed system will be evaluated. This study highlights the environmentally friendly characteristics of the thermoelectric module and emphasizes its potential to provide innovative and practical solutions for everyday applications. The prototype, which can fulfill low-scale cooling or heating requirements, along with the thermoelectric module utilized, presents an environmentally sustainable alternative. Furthermore, its suitability for desktop use offers a convenient application that contributes to reducing environmental impacts in daily life.

Thermoelectric Concept

The initial findings regarding the concept of thermoelectricity were first introduced by the German scientist Thomas Seebeck in 1821 [1]. It was observed that a potential difference, or electromotive force, arises when the junction point is heated in a closed circuit composed of two different types of metals [1, 2]. The phenomenon involving the generation of heat through thermoelectric (TE) effects, or the production of electrical energy from a temperature difference, is referred to as a thermoelectric event. The device used to facilitate this process is known as a thermoelectric module [3].

Thermoelectric Module

Thermoelectric modules, as illustrated in Figure 1, consist of both p-type and n-type semiconductors. These p-type and n-type semiconductors are arranged closely between two ceramic layers. When an electric current passes through these semiconductors, heat transfer occurs. Thermoelectric modules operate using direct current (DC). Depending on the polarity of the current applied to the module, heat is absorbed from one ceramic plate surface and transferred to

the other. When the direction of the current is reversed, the sides of heating and cooling also switch accordingly.

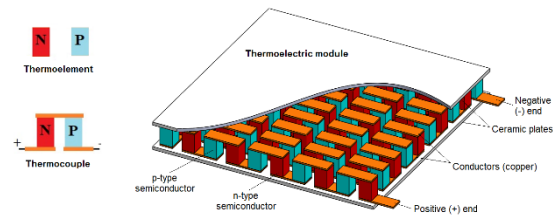


Figure 1: Structure and elements in a thermoelectric module

Thermoelectric Effects

The objectives of cooling, heating, or power generation in thermoelectric (TE) modules are achieved through the movement of electrons within the semiconductor materials. These thermoelectric effects are categorized as the Seebeck effect, Peltier effect, Thomson effect, and Thomson-Kelvin relations.

Seebeck Effect

In a circuit composed of n-type and p-type semiconductor materials connected in series, an electrical potential difference is generated when there is a temperature difference between the junctions. [6].

$$\Delta V = \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad (1)$$

To enhance the magnitude and efficiency of the thermoelectric effect, the Seebeck coefficient (α_{AB}) should be high.

Table 1: Seebeck coefficients of some materials [9]

Material	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V/K}$)	Material	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V/K}$)	Material	Seebeck Coefficient ($\mu\text{V/K}$)
Aluminum	3.5	Gold	6.5	Germanium	300
Antimony	47	Iron	19	Potassium	-9
Bismuth	-72	Lead	4	Selenium	900
Cadmium	7.5	Mercury	0.6	Silicon	440
Carbon	3	Nichrome	25	Sodium	-2
Constantan	-35	Platinum	0	Tellurium	500

Peltier Effect

Peltier observed that when an electric current flows through a closed circuit consisting of two different wires, heat is released at one junction while heat is absorbed at the other junction [1].

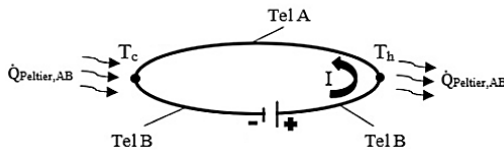


Figure 2: Schematic representation of the Peltier effect [5]

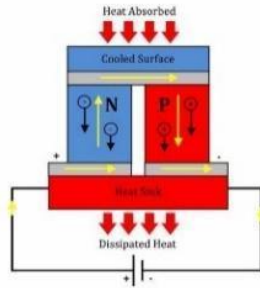


Figure 3: Peltier effect circuit diagram [10]

The movement of electrons within the circuit is driven by the electrical power supplied externally. Depending on the direction of the current flow, one surface of the junction experiences cooling, while the opposite surface undergoes heating. This phenomenon is illustrated in Figure 3 [11].

$$\dot{Q}_{Peltier} = \pi_{AB} \cdot I \quad (3)$$

In Equation (3), Q_p represents the heat transfer per unit time, I is the direct current flowing through the circuit, and π denotes the Peltier constant [7]. The relationship between the Peltier constant (π) and the Seebeck coefficient (α) is provided in Equation (4). In this equation, π_{AB} quantifies the extent of Peltier heating or cooling generated by the direct current in the system.

$$\pi_{AB} = \alpha T \quad (4)$$

Thomson Effect

The Thomson effect occurs when a temperature gradient is established between two points along a single conductor and an electric current is passed through the conductor. [7].

Heat Conduction and Joule Heating

The cooling power of the Peltier effect is influenced by several factors. Due to heat conduction (Fourier effect) and the Joule effect, the temperature difference between the hot and cold surfaces does not change uniformly [15]. The

formula describing the heat generated in a conductor through which an electric current flows is presented in Equation (5) [7].

$$\dot{Q}_{joule} = I^2 \cdot R \quad (5)$$

Since the thermoelectric materials with semiconductor properties used in the system are solid, the thermocouples within the TE modules are in solid-solid contact with each other. As a result of this contact, heat is transferred from the hot side of the surface to the cold side. This heat transfer is expressed in Equation (6).

$$\dot{Q}_{iletim} = k A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (6)$$

Due to the Fourier and Joule effects, the temperature change between the hot and cold surfaces does not occur uniformly. In the steady state of the circuit, the amount of heat absorbed from the cold surface is given by the equation $Q_p = \alpha T I$. The undesirable heat gain in the reverse case is expressed in Equation (7).

$$Q = \alpha T_R I - \frac{1}{2} I^2 R + K \Delta T \quad (7)$$

In Equation (7), R represents the electrical resistance, ΔT is the temperature difference ($T_H - T_C$), k is the thermal conductivity, I is the current, T_H is the hot surface temperature, T_C is the cold surface temperature, and α denotes the Seebeck coefficient.

II. LITERATURE REVIEW

Iskan et al. conducted a study on a fruit-drying prototype utilizing a Peltier module. It was carried out under two different scenarios. In the first scenario, airflow was provided solely by a fan located in the drying zone of the Peltier module. In the second scenario, dual-fan drying was implemented by adding an axial fan to the dehumidification zone in addition to the drying zone. The results showed that the use of the Peltier module effectively maintained relative humidity levels within the desired range [12].

Raza et al. conducted a study on a portable refrigerator utilizing a Peltier module. The primary objectives of their research were to explore methods for enhancing the efficiency of Peltier-based cooling systems and to investigate novel heat sink designs aimed at improving the overall performance of the Peltier cooler [13].

Attavane et al. developed a prototype of a portable food warmer and cooler powered by solar energy and the Peltier effect. This study highlights the advantages of employing a Peltier module, with the aim of utilizing both its heating and cooling capabilities. The electrical power required to operate the system is supplied by a foldable solar panel that charges a Lithium Polymer (Li-Po) battery [14].

III. PATENT RESEARCH

KR20240174711(A), 2024-12-17, Park Je-jung — Windows with Thermoelectric Elements for Self-Production

In this patent, thermoelectric (TE) elements are integrated into a window system. Electricity is generated by utilizing

the temperature difference between the interior and exterior of a building. The TE elements are connected through the glass, and the harvested energy is stored in a high-capacity battery, enabling users to access power at any time and location.

WO2006064432(A1), 2006-06-22, ARCELIK A.Ş. — A Thermoelectric Cooling/Heating Appliance

The primary goal of this patent application is to develop a compact, energy-efficient, and electrically operated smart heating and cooling device, similar to a thermos. The design aims to enhance heat transfer efficiency while minimizing losses in thermoelectric elements. Compared to conventional systems, it offers advantages such as smaller size, faster thermal response, portability, and broader applicability—from food and beverage temperature control to medical device support.

IV. MATERIALS AND METHODS

This section presents the materials required for the prototyping of the proposed project, outlines the properties of selected core components, and introduces a sample prototype design.

Peltier Module

The dimensions of the Peltier module are 40 mm × 40 mm × 3.8 mm. A 12-volt module was selected for use in the project. **Figure 4** provides a visual representation of the module.



Figure 4: Thermoelectric module

Table 2: Performance conditions of the module

Parameter	Value
Temperature Difference ΔT_{max}	67 °C
Operating Current I_{max}	4–6.6 A (12V)
Maximum Cooling Power	50–60 W
Operating Environment	-55 °C to 83 °C
Peltier Voltage	DC 12 V
Module Resistance (Ohm)	1.98–2.3

Cooling Block (Heat Sink)

For the Peltier module to effectively remove heat from the cold surface, the heat absorbed must be transferred to the opposite surface. If the heated surface is not adequately cooled, overheating can damage the internal structure of the Peltier module. To prevent this, cooling blocks will be employed in this project to dissipate heat from the heated surfaces [15].

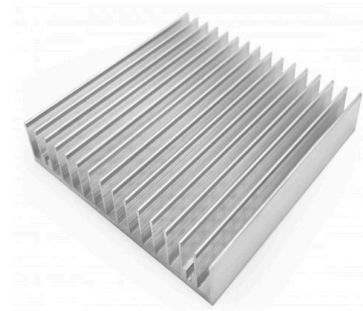


Figure 5: Aluminum Heatsink

Fan

Fan measuring 12 cm × 12 cm will be utilized in the project. On the hot side, a larger 12 cm × 12 cm fan will be installed on a correspondingly larger aluminum heat sink. The primary function of the fan on the hot side is to facilitate rapid dissipation of the heat generated by the Peltier module [15].

3D Modeling

Within the scope of the project, the prototype was designed using SolidWorks software. During the design process, the mug's mouth diameter was set to 8 cm, the base diameter to 5 cm, the handle length to 5 cm, and the overall length of the mug to 10 cm. The opening and closing mechanism of the prototype was designed as a sliding system. Figure 7 presents the top, side, closed, and half-open views of the prototype.

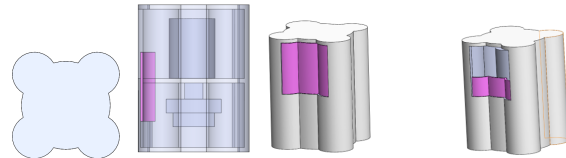


Figure 7: Top, closed and half-open view of the designed prototype

Analysis

The aluminum heat sink used in the system has been analyzed, and general analysis procedures for the overall system are ongoing. Mesh settings and body sizing were applied to the geometry, with an element size set to 0.005 m. Aluminum was selected as the material for the analysis. The initial temperature was uniformly set to 22°C.

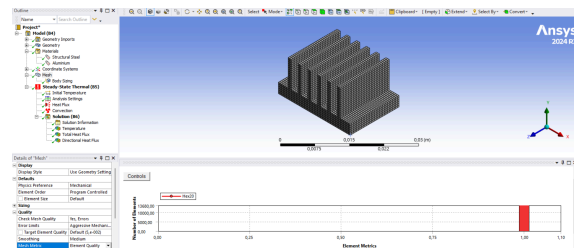


Figure 8: Solid model of heat sink / Mesh

The small temperature difference across the heat sink indicates a balanced heat transfer within the component.

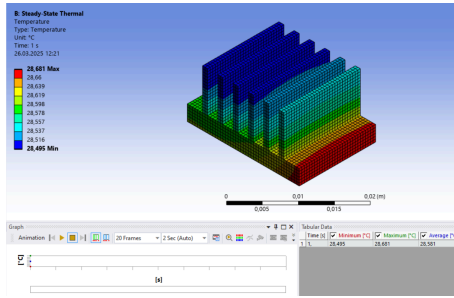


Figure 9: Analysis results

The temperature, current, total current density and electrical voltage of a single p-type and n-type pair were analyzed.

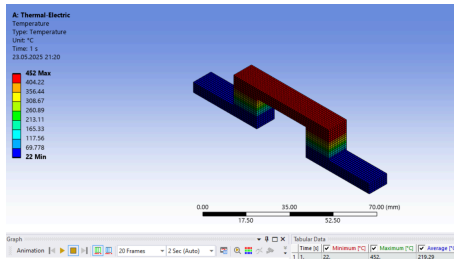


Figure 10: p and n type temperature variation

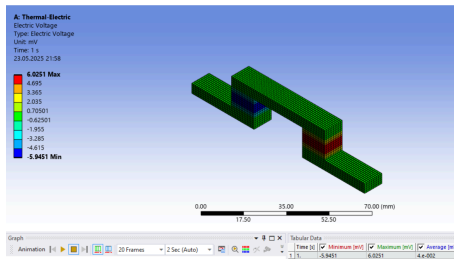


Figure 11: p and n type voltage variation

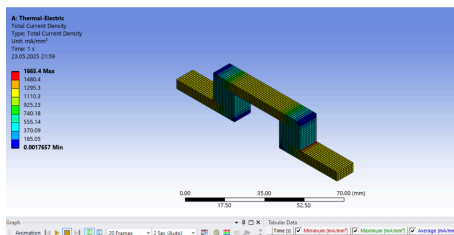


Figure 12: p and n type total current density variation

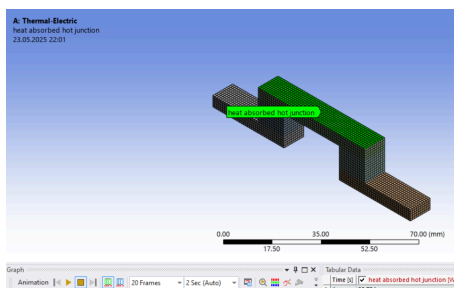


Figure 13: p and n type heat absorbed hot junction variation

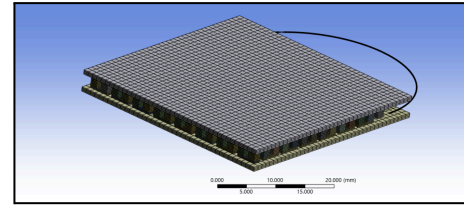


Figure 14: Thermoelectric module mesh

For the analysis of the Peltier module, a separate mesh was generated for the ceramic layers on both the hot and cold sides using the sweep method. Body sizing was applied to the p-type and n-type semiconductor elements.

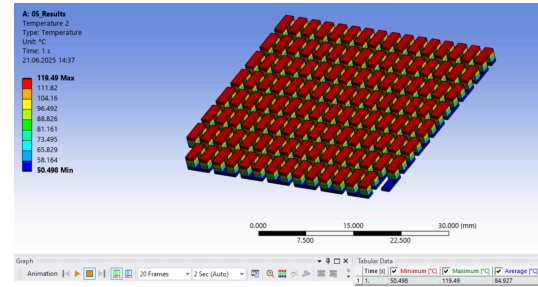


Figure 15: Thermoelectric module temperature

The temperature on the hot side of the ceramic can reach up to 120 °C, while the cold side remains around 50 °C.

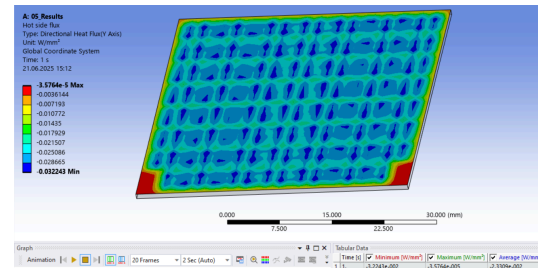


Figure 16: Thermoelectric module temperature

V. CONCLUSIONS

The thermal analysis process is currently future studies, and prototype production is being carried out using a 3D printer. Upon completion of the analysis and prototyping stages, a patent application will be submitted. Numerical analysis revealed a significant temperature gradient between the p-type and n-type semiconductor elements within the thermoelectric module. Both experimental and numerical studies demonstrated that, in heating mode, the hot side of the module can reach temperatures up to 120 °C, while in cooling mode, the cold side can decrease to as low as 16 °C.

VI. REFERENCES

- [1] Gürçan, A. (2019). *Recovery of exhaust heat energy using different sizes of thermoelectric generators* (Master's thesis, Pamukkale University, Denizli).
- [2] Seebeck, T. J. (1823). Magnetic polarization of metals and minerals. *Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 265.
- [3] Pamukkale University. (2025, January 26). *What is thermoelectricity?* Retrieved from <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/tr/sayfa/termoelektrik-nedir-2>

- [4] Demiröz, Ö. B., & Dilibal, S. (2021). Design and fabrication of aluminum alloy heat sink for thermoelectric modules using direct metal laser sintering additive manufacturing method. *International Journal of 3D Printing Technology and Digital Industry*, 5(1), 23–33.
- [5] Lee, H. (2017). *Thermoelectrics design and materials*. John Wiley & Sons Ltd.
- [6] Derebasi, N. (2015). *Investigation of geometric structural effects in thermoelectric cooling cells* (Doctoral dissertation, Uludag University, Bursa).
- [7] Pamukkale University. (n.d.). *Thermoelectric effects*. Retrieved January 25, 2025, from <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/tr/sayfa/termoelektrik-sistem>
- [8] Şimşek, M. (2015). *Vehicle air conditioning design using Peltier module* (Master's thesis, Afyon Kocatepe University). Afyonkarahisar, Turkey.
- [9] Kim, M., Kang, Y.-K., Joung, J., & Jeong, J.-W. (2022). Cooling performance prediction for hydraulic thermoelectric radiant cooling panels with experimental validation. *Sustainability*, 14(23), 16214.
- [10] Usta, H., & Kırmacı, V. (2002). Thermoelectric effects and application of cooling efficiency. *Technology*, 5(3-4), 65–71. Ankara, Turkey.
- [11] İşkan, Ü., Yüksel, A., & Tunçal, C. (2024, March). An innovative approach on fruit drying prototype: Drying with Peltier module. Paper presented at the 11th International Zeugma Conference on Scientific Research, Gaziantep, Turkey.
- [12] Sandeep, B., Sandeep, K. H., Hemanth, K., Raza, M., & Devi, B. U. (n.d.). Fabrication of a portable refrigerator using thermoelectric Peltier module (Bachelor's thesis). Department of Mechanical Engineering, Anil Neerukonda Institute of Technology and Sciences, Visakhapatnam, India.
- [13] Attavane, P., G B, A., Radhakrishna, R., & Rao Jadav, S. (2017). Solar powered portable food warmer and cooler based on Peltier effect. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics Information & Communication Technology (RTEICT)* (pp. 287–292). IEEE.
- [14] Robiz. (n.d.). *Homepage*. Retrieved January 30, 2025, from <https://robiz.net/>

VI.1. PATENT REFERENCES

World Patent WO2006064432 (A1), 2006-06-22 “A THERMOELECTRIC COOLING/HEATING APPLIANCE” Also published CN100592009 (C) ; CN101084402 (A) ; JP2008523874 (A) ; JP4560550 (B2) ; TR200703485 (T1)

World Patent KR20240174711 (A), 2024-12-17 “자가발전을 위한 열전소자가 접목된 창문” (Kendi kendine üretim için termoelektrik elemanlara sahip pencereler)

Design and Prototype Development of an Adaptive Hair Dryer to Prevent Hair Damage

Necip Burak Ünal, Kemal Sarıoğlu

Istanbul Health and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye

ABSTRACT

In this study, an innovative and energy-efficient hair dryer prototype was designed and developed with the aim of enhancing user safety, preserving hair health, and improving overall performance. Conventional hair dryers often operate with fixed airflow and temperature levels, which can result in excessive heat exposure, increased noise, and energy inefficiency—ultimately leading to potential damage to the user's hair.

To address these issues, a smart control system was integrated into the device using an ultrasonic distance sensor and a PID (Proportional-Integral-Derivative) algorithm, allowing the temperature and fan speed to be dynamically adjusted based on the proximity of the hair. The mechanical housing and internal structure of the device were modeled using SolidWorks, while airflow and thermal distribution were analyzed and optimized through simulations conducted in ANSYS Fluent.

Experimental testing was carried out under various operational conditions using thermocouples and airflow sensors. The results showed that the prototype maintained more stable and safer temperature levels near the hair surface, achieved better thermal distribution, and operated with improved acoustic comfort. Compared to conventional models, the developed system demonstrated significantly better energy usage control and provided a quieter and more user-friendly drying experience. This project highlights a multidisciplinary engineering approach, combining mechanical design, control systems, and thermal-fluid analysis to develop a more intelligent, efficient, and user-centered hair drying solution.

Keywords: Hair Dryer, Thermal Control, Energy Efficiency, PID Controller, Airflow Simulation.

I. INTRODUCTION

Hair dryers have become essential personal care devices, widely used in daily routines for quick and convenient hair drying. The first handheld hair dryer was introduced in the early 1920s, and since then, the technology has evolved considerably—from bulky, low-powered designs to compact, lightweight, and more efficient models. Despite decades of development, many commercially available hair dryers still rely on fixed heating elements and manually adjustable fan speeds, which often fail to respond dynamically to usage conditions or individual hair characteristics.

This lack of adaptability can result in excessive heat exposure, particularly when users hold the device too close or operate it for extended periods. High-temperature airflow not only causes dehydration of the hair shaft but also leads to surface damage and long-term weakening of the hair fiber structure. Studies have shown that exposure to temperatures above 60°C can significantly degrade the cuticle layer, increasing the risk of breakage, dullness, and split ends. Conversely, controlled drying at moderate temperatures—such as 47°C from a 15 cm distance—can minimize this damage while still ensuring adequate drying performance[1].

In recent years, there has been a growing demand for smart and responsive appliances that can autonomously adapt to environmental or user-specific conditions. This trend has opened opportunities for innovation in personal care technologies, including hair dryers, where intelligent control systems, temperature feedback loops, and energy-saving mechanisms can greatly enhance functionality and safety.

To address these challenges, the present study adopted a multidisciplinary engineering approach. A prototype hair dryer was designed and developed with an adaptive control system that integrates real-time distance sensing and PID (Proportional-Integral-Derivative) control to adjust fan speed and heating intensity dynamically. The mechanical housing and internal airflow components were modeled in SolidWorks, and thermal-flow simulations were conducted using ANSYS Fluent to optimize performance. In addition to preserving hair health, the project aimed to improve energy efficiency, reduce operational noise, and enhance user comfort. The integration of mechanical design, fluid dynamics, thermal management, and control theory formed the basis of a sustainable, user-focused hair drying solution.

II. LITERATURE AND PATENT SURVEY

In the early stages of this study, a comprehensive literature review and patent analysis were conducted to identify the current limitations of conventional hair dryers and to establish a scientifically grounded foundation for the prototype development. Understanding previous research findings and technological advancements helped determine key parameters such as optimal drying temperature, safe airflow distribution, energy efficiency strategies, and the integration of control mechanisms. The reviewed studies also provided valuable insights into user safety, noise reduction, and thermal damage minimization.

Among the academic studies examined, the work of Kim et al. (2011) was particularly influential, as it investigated the effects of different drying temperatures and durations on human hair using scanning electron microscopy (SEM). The study demonstrated that prolonged exposure to high

temperatures leads to cuticle disruption and surface damage, while drying at 47°C from a 15 cm distance significantly reduces these adverse effects [1]. These findings directly shaped the selection of temperature and distance parameters used in our prototype testing.

Additionally, Bhor et al. (2020) developed a temperature control loop for hair dryers using Arduino-based systems. Although relatively simple, their approach highlighted the potential of integrating microcontrollers and sensors to achieve automated regulation. This concept was further adapted and improved in our work by incorporating a PID (Proportional-Integral-Derivative) algorithm and ultrasonic distance sensing for real-time feedback [2].

From an energy efficiency standpoint, Li et al. (2008) emphasized the importance of optimizing small home appliances such as hair dryers and coffee makers by applying sustainable design principles. Their findings underscored the need for intelligent power control to minimize unnecessary energy waste without compromising user performance expectations [3].

Patent research also played a critical role in identifying existing commercial solutions and design gaps. For instance, US Patent No. US20060070301A1 describes a hair dryer with built-in humidity and temperature sensors for automatic regulation, while US Patent No. US7296367B2 outlines an air duct design that minimizes acoustic noise. These patents guided the integration of real-time feedback systems and air outlet modifications in our prototype, supporting both functional enhancement and user comfort.

Overall, the literature and patent survey reinforced the importance of combining control systems, mechanical redesign, and simulation-driven optimization to create a next-generation hair drying solution that is both effective and safe. This knowledge base was instrumental in shaping the problem definition, component selection, and testing methodology throughout the development process.

Key Research Articles

Kim et al. (2011) investigated the effects of drying temperature and distance on hair surface damage using scanning electron microscopy (SEM). Their findings confirmed that drying at 47 °C from 15 cm distance causes minimal structural damage to hair, forming the scientific basis for our control strategy [1].

Bhor et al. (2020) developed a basic temperature control loop for hair dryers using Arduino. This study guided the implementation of a smart control algorithm (PID) and real-time sensor feedback in our prototype [2].

Li et al. (2008) focused on energy-saving design approaches for small appliances, including hair dryers. Their work influenced our energy optimization strategy and the integration of distance-based heat regulation [3].

Referenced Patents

US Patent No: US20060070301A1 describes a hair dryer with an integrated humidity sensor and temperature control

system. It inspired the feedback-based adjustment concept in our design.

US Patent No: US7296367B2 outlines a hair dryer with noise-reduction features through air duct shaping. This patent informed our outlet design modifications to improve acoustic performance.

III. MATERIALS AND METHODS

The design and development process began with a comprehensive literature and patent review to identify technical limitations and innovation opportunities in existing hair dryers. A feasibility analysis and cost estimation were conducted to guide component selection and prototype planning.

The mechanical design of the device was modeled using SolidWorks, and ANSYS Fluent was employed to simulate airflow and thermal behavior within the system. These simulations helped optimize the geometry of the air outlet and fan configuration to achieve even heat distribution and efficient airflow.

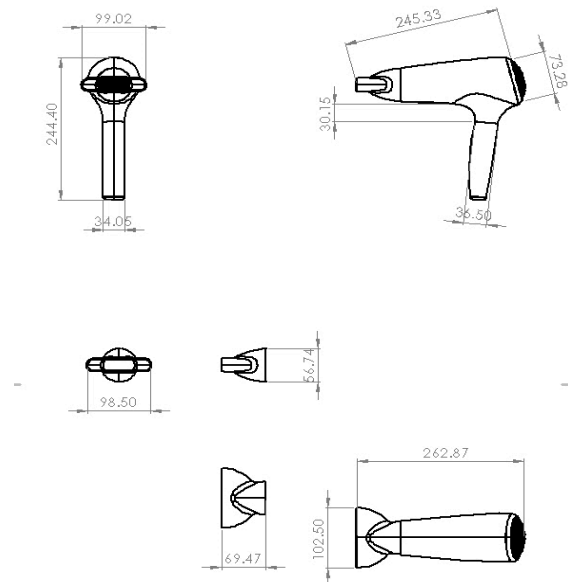


Figure 1: Hair Dryer Prototype –Sketch Study

A Raspberry Pi microcontroller was selected as the central unit of the control system due to its flexibility, processing power, and compatibility with various sensors and programming environments. The Raspberry Pi served as the processing hub for data acquisition, control logic execution, and communication between components.

To enable real-time environmental sensing, an ultrasonic distance sensor (HC-SR04) was integrated into the front of the device. This sensor continuously measured the distance between the hair dryer and the user's head with a high degree of accuracy. The collected distance data served as a dynamic input for controlling the drying parameters.

A PID (Proportional-Integral-Derivative) control algorithm was written in Python and deployed on the Raspberry Pi to process the sensor data and compute the appropriate response. The PID controller regulated both fan speed and

heating element power, ensuring that the airflow and temperature remained within safe and efficient limits relative to the detected distance. For instance, when the device was closer to the user's head, the algorithm automatically reduced the heat output and airflow intensity to avoid potential thermal damage. Conversely, when the device was farther away, it increased output to maintain drying efficiency.

The use of PID control provided smooth, gradual transitions in temperature and airflow, avoiding abrupt changes that could compromise user comfort or hair protection. This closed-loop control approach allowed the system to adapt continuously to varying real-time conditions, demonstrating a responsive and intelligent control mechanism that outperformed conventional static systems.

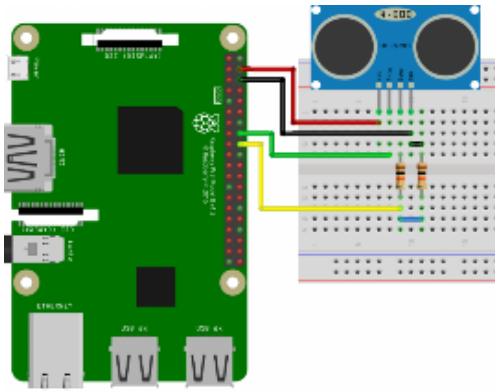


Figure 2: Raspberry Pi – HC-SR04 Ultrasonic Distance Sensor Circuit

Both simulated and experimental tests were carried out. In experimental testing, temperature and airflow measurements were collected using thermocouples and an anemometer. Noise levels were evaluated using a decibel meter in a controlled environment. These measurements were used to validate simulation results and assess performance under realistic conditions.

Table 1: Experimental Results on Temperature, Drying Distance, Power Consumption, and Hair Damage

IV. RESULT AND DISCUSSION

Test No	Distance (cm)	Temp. (°C)	Drying Time (s)	Power Consumption (W)	Hair Surface Damage
A	No drying	-	-	-	No damage
B	0 (air dry)	20	600	0	Minimal
C	15	47	60	900	Low
D	10	61	30	1100	Moderate
E	5	95	15	1500	High

The simulation studies conducted in ANSYS Fluent demonstrated that the optimized air outlet geometry provided more uniform airflow and better heat distribution compared to conventional designs. The temperature at the hair surface remained stable around 47°C when the distance sensor detected a 15 cm gap, confirming the system's ability to dynamically regulate heat delivery [1].

Experimental tests supported the simulation results. Temperature fluctuations were minimized through the implemented PID control algorithm, and real-time distance measurement enabled automatic adaptation of both fan speed and heating power. As a result, overheating risks were significantly reduced, contributing to improved hair safety. Energy consumption was also evaluated during testing. The implementation of the smart control system resulted in a noticeable improvement in energy efficiency compared to standard hair dryers [3], without compromising the drying performance. Additionally, the redesign of the fan and air duct improved airflow dynamics and contributed to a reduction in operational noise levels, enhancing overall user comfort during use [4].

The prototype successfully addressed key performance issues seen in traditional hair dryers. By integrating intelligent control and optimized mechanical design, the system delivered consistent and efficient drying while prioritizing both energy efficiency and user safety. These findings highlighted the potential of combining thermal analysis, automation, and mechanical engineering to enhance everyday appliances.

V. CONCLUSIONS

In this study, a smart and energy-efficient hair dryer prototype was successfully developed by integrating control systems, thermal simulations, and mechanical design principles. The device was equipped with a distance sensor and a PID-based algorithm, allowing it to dynamically regulate airflow and temperature according to user proximity.

Simulation results and experimental tests confirmed that the developed system was able to maintain optimal drying conditions, particularly by preserving a stable temperature of approximately 47 °C at a distance of 15 cm. This setting was found to be effective in achieving efficient hair drying while minimizing the risk of thermal damage. The implementation of the distance-sensitive control algorithm allowed the device to automatically adjust airflow and heat output in real time, resulting in more consistent and user-appropriate performance.

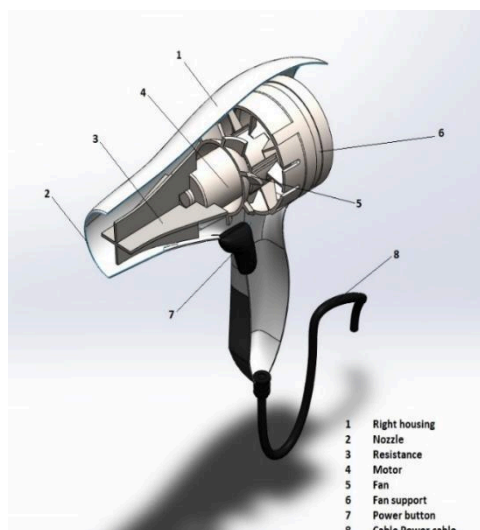


Figure 3: Hair Dryer Assembly Exploded Diagram

Compared to conventional models, the prototype demonstrated notable improvements in both energy usage and acoustic behavior. Instead of operating at a constant high power, the system dynamically adapted its output, thereby reducing unnecessary energy consumption during use. Similarly, the redesigned air outlet and fan configuration contributed to a quieter operating experience, which is a significant advantage in terms of daily user comfort.

These enhancements not only elevated the overall usability of the device but also contributed meaningfully to hair health by preventing excessive heat exposure and improving drying uniformity. The combination of intelligent regulation and optimized design offered a safer and more user-friendly alternative to traditional hair dryers.

The project demonstrated the effectiveness of a multidisciplinary engineering approach, combining fluid dynamics, heat transfer, embedded systems, and user-centered design. The developed prototype may serve as a foundation for future commercial products that are both sustainable and technologically advanced.

Further research may focus on refining the industrial design, testing the device on different hair types, and exploring AI-based adaptive systems for personalized drying profiles.

VI. REFERENCES

- [1] Kim, J. W., Kim, H.-S., Ham, D. S., Shin, M. K., & Lee, S. H. (2011). Hair shaft damage from heat and drying time of hair dryer. *Annals of Dermatology*, 23(4), 455–462.
<https://doi.org/10.5021/ad.2011.23.4.455>
- [2] Bhor, J., Pawar, S., & Das, S. (2020). Design and Development of Temperature Control Loop of Hair Dryer Using Arduino. *I4Tech* 2020.
<https://doi.org/10.1109/I4Tech48345.2020.9102685>
- [3] Li, H., Zhang, H.-C., Tate, D., & Carrell, J. (2008). Improvement of home appliances design based on energy-saving concept: Case studies on hair dryer and coffee maker. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*.
<https://doi.org/10.1109/ISEE.2008.4562889>
- [4] Che, L., Lee, H. M., & Lee, H. P. (2024). Acoustical analysis and optimization design of the hair dryers. *Noise Control Engineering Journal*.
<https://doi.org/10.1515/noise-2024-0004>
- [5] Wikipedia contributors. (n.d.). Sac kurutma makinesi. Wikipedia. Retrieved from https://tr.wikipedia.org/wiki/Sa%C3%A7_kurutma_makinesi
- [6] Journal of Applied Fluid Mechanics. (2016). *Vol. 9, No. 2*, pp. 935–944.
<https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.24081>
- [7] Journal of Applied Fluid Mechanics. (2015). *Vol. 8, No. 1*, pp. 133–142.
<https://doi.org/10.36884/jafm.8.01.21872>

Solar-Assisted Electric Vehicle Topologies: A Comparative Analysis

Besim Söğüt

Yıldız Technical University, Faculty of Machinery, Department of Mechatronics Engineering, Istanbul, Türkiye

ABSTRACT

Adopting non-fossil fuel sources is essential for achieving the goal of true zero emissions. In this regard, solar-assisted electric vehicles have emerged as a promising option for green transportation. This study investigates the application of solar covering technology in various electric vehicle topologies, including micro-hybrid, mild-hybrid, plug-in hybrid, and all-battery electric vehicles. The focus of this paper is on the potential advantages of using solar covering technology to extend the range and battery life of these vehicles. By conducting a comparative analysis of each topology's performance, this paper demonstrates the effectiveness of solar covering technology in addressing these issues. Furthermore, the paper highlights the challenges associated with integrating solar covering technology into electric vehicles, such as roof and hood integration, and provides suggestions for enhancing vehicle performance under average sunlight. This study significantly contributes to the field of solar-assisted electric vehicles by shedding light on the efficiency of solar covering technology in extending the range and lifespan of electric vehicle batteries.

Keywords: Solar Energy, Electric Vehicles, PV Panel, Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Topology, Solar Assisted.

I. INTRODUCTION

Electric vehicles (EVs) have gained significant popularity in recent years as a means to reduce our reliance on fossil fuels and combat climate change. By utilizing electricity from renewable sources, EVs can contribute to a more sustainable future by significantly reducing greenhouse gas emissions. However, EVs alone are not sufficient. To fully maximize the benefits of electric transportation, it is crucial to consider the integration of solar panels on these vehicles.

The concept of combining solar power with electric vehicles is not new and dates back several decades. In the 1950s, Bell Labs developed a solar-powered vehicle capable of reaching speeds up to 30 miles per hour. Later, in the 1970s, the University of Delaware created a solar-powered electric car that could travel over 100 miles on a single charge. [1]

Today, the integration of EVs and solar power has become more practical than ever before. The cost of solar panels has significantly decreased in recent years, making them more accessible to consumers. Many EV manufacturers, including Tesla, are incorporating solar panels into their vehicles as optional or standard features. For instance, Tesla's Model 3 offers a built-in solar panel system that enables the car to recharge its battery using solar power, providing an additional range of up to 30 miles per day.[2] Other companies, like Lightyear, are developing solar-powered EVs adding up to 70 km using PV panel.

In our study, the integration of PV panels to different vehicles was evaluated in various simulations. In this context, the most suitable topology types were determined by comparing the gains achieved in HEV, PHEV, BEV and REEV(Range Extender Electric Vehicle) vehicles, thus contributing to the literature.

II. IMPORTANCE OF PV PANEL

As in the study [14], solar panels can be used as charging stations. These systems are more stable and have longer lifespans for the lifecycle of solar panels.

III. PV ASSISTED EV EXAMPLES

III.1. Lightyear One



Figure 1: Lightyear One [15]

There are several notable projects and examples of solar-assisted electric vehicles available in the market, with one of them being the Lightyear Zero developed by the Lightyear team. The team initiated their project in 2016 and commenced production in 2021, currently manufacturing one car per week. This vehicle incorporates solar panels on its roof, truck, and hood, enabling in-car charging of the electric battery packs. These photovoltaic (PV) panels have a positive impact on the vehicle's state of charge and range. With a full charge, the Lightyear Zero boasts a range of 625 km, which is further extended by 70 km each day through the use of PV panels. Figure 1 illustrates the integration of solar cells on the top surfaces of the car [15].

IV. EV TOPOLOGIES

We can categorize the electric vehicles as HEV, PHEV, BEV, and REEV. The main differences are that BEVs are fully electric, relying solely on battery power and charging from external sources, while HEVs and PHEVs combine internal combustion engines with electric motors and batteries. HEVs charge their batteries through engine

power and regenerative braking, while PHEVs can be charged externally in addition to these methods. Conventional vehicles, on the other hand, operate solely on internal combustion engines and do not have electric components. The least ecological friendly is conventional one. As in the study [17], electrification of the vehicle can be categorized. In addition, control algorithms can play a role in energy management as a topology type. In addition, solar panels and control algorithms can be merged for energy management [18]. In our study, the vehicles can be categorized as Series, Parallel, Series-Parallel, Complex according to powertrain as in Figure 3 [19].

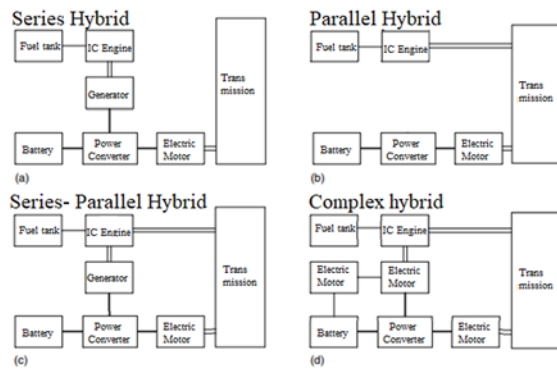


Figure 2: HEV – PHEV – BEV [19]

V. SIMULATION

We applied 3 types of scenarios for each topology.

These scenarios can be clearly described as the vehicle does not have a PV panel, PV panel is connected electrically connected to the low voltage battery, and finally a PV panel is electrically connected to the high voltage bus. Even these 3 situations can be listed as items.

- No PV
- PV connected to Low-Voltage Bus
- PV connected to High Voltage Bus

Consequently, the influence of a PV panel can vary depending on the voltage of the battery. Simulation platforms such as Matlab/Simulink and Amber Autonomie are utilized in this study, with the 4-hour WLTP(Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure) cycle serving as the input for the simulations. Through these platforms and inputs, an analysis was conducted and comparison of energy-saving ratios, discharging time among different topologies, and the impact of solar PV panel additions. Figure 4 represents an 1800-second cycle, which is scaled to a 4-hour cycle to facilitate better model analysis.

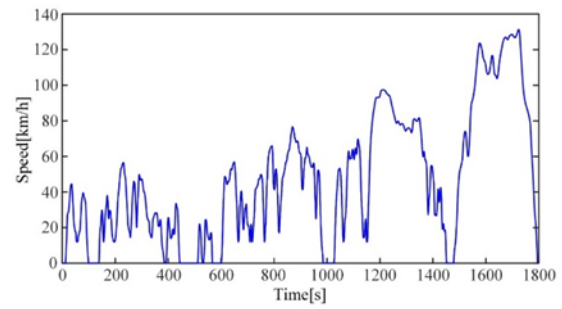


Figure 3: WLTP Cycle

V.1. Simulation Tools

The simulation studies utilized the Matlab 2022b version in this research. The Autonomie platform, installed within Matlab, enabled the analysis of various vehicle topologies and different driving cycles. While the Simulink topologies created with the Autonomie platform lacked flexibility for adding PV panels, the utilization of PV panels could be represented by feeding negative current to the auxiliary power connection, considering efficiency losses.

V.2. Simulation of Topologies

This model has input driver data block, plant block as vehicle and output data block. Input data is selected in Autonomie software. These models are simulated for parameter calculations with the effect of PV panel.

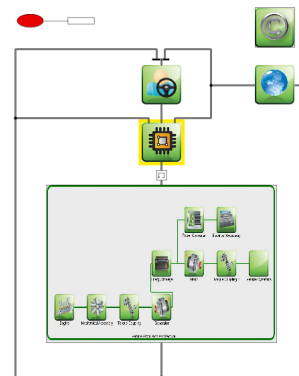


Figure 4: EV Simulink Model with Cycle Input

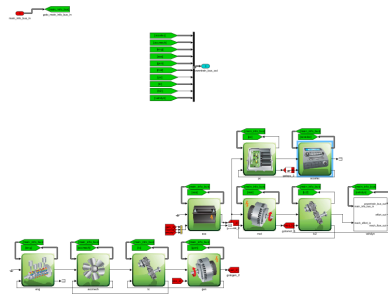


Figure 5: EV Structure Model in Simulink

Plant block as vehicle has subsystems like battery, engine, transmission etc. For low voltage bus, PV panel is added in electrical accessory block, for high voltage bus, it is added in battery main block.

V.3. Simulation Results

9 different topologies are worked on, such as HEV, PHEV, BEV, REEV vehicles. For each topology, 3 different connection types are simulated. And according to all parameters such as SOC, fuel rate, discharge time; the most suitable one is Series Engine PHEV according to results, and it is shown below with 3 different connection types.

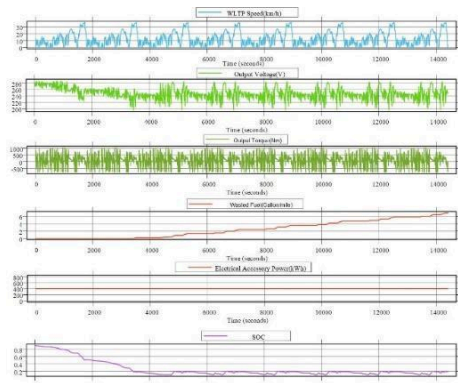


Figure 6: Simulation of a Series Engine PHEV without PV Panel

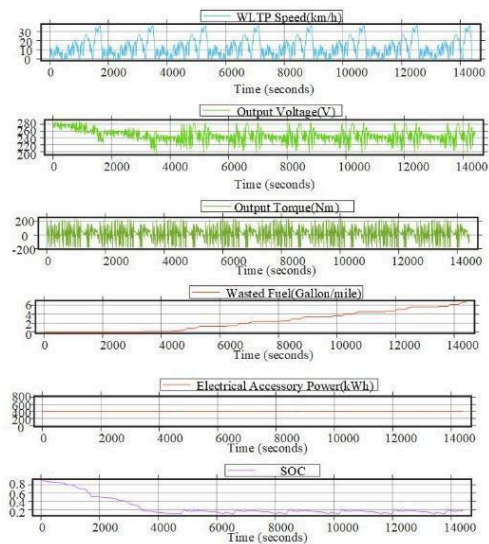


Figure 8: Simulation of a Series Engine PHEV with PV Panel for main battery

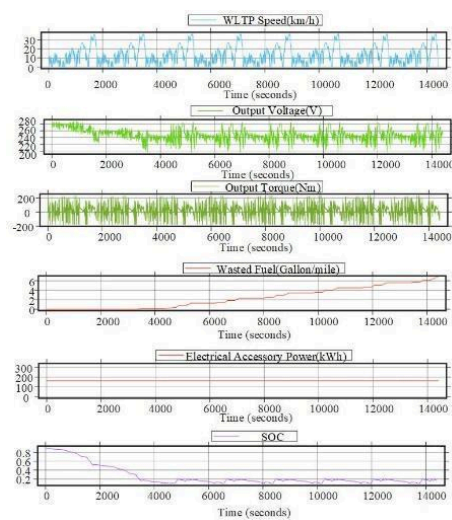


Figure 7: Simulation of a Series Engine PHEV with PV Panel for 12 V battery

VI. CONCLUSION

In this study, the integration of PV panels has been evaluated for electric vehicles with different topologies. The WLTP cycles are utilized for the modelling and simulation of 18 distinct electric vehicle models. Energy consumption, energy discrepancies, topology ratios, and discharge times are employed to compare simulations of models with and without PV panels across different topologies. PV panels are integrated into two separate components of the topologies: first as an electrical accessory, and then directly connected to the battery. Consequently, each topology undergoes three distinct simulations. In general, the addition of PV panels to the battery yields a more pronounced effect.

The series engines HEV is identified as the most cost-effective hybrid electric vehicle (HEV) model when the primary battery is connected to a PV panel. This determination is based on energy differences and energy savings ratios, with the PV panel contributing to an approximate energy savings of 8.4% in this model.

Considering energy savings, associated ratios, and discharge times across all simulation results, the Parallel Transmission PHEV emerges as the most economical HEV model when the primary battery is connected to a solar panel. This particular topology and model demonstrate superior cost-effectiveness based on prevailing fuel prices as well. The integration of PV panels leads to an energy savings of 7.7% and an extended discharge time of 19.7%.

VII. REFERENCES

- [1] Fletcher S. *Bottled Lightning: Superbatteries, Electric Cars, and the New Lithium Economy*, Macmillan, 2011
- [2] Mukhlisa, Begmatova. "An Innovative and Environmentally Friendly Solution for Extending the Reserve Range of Electric Vehicles." *Gospodarka i Innowacje*. 23 (2022): 457-560.
- [3] X. Li, L. A. C. Lopes and S. S. Williamson, "On the suitability of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) charging infrastructures based on wind and solar energy," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada, 2009, pp. 1-8
- [4] M. Satyendra Kumar, Shripad T. Revankar, Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, 2017, Pages 1266-1285
- [5] Geetha, A., and Subramani, C. (2017) A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles. *Int. J. Energy Res.*, 41: 1817– 1834.
- [6] P. Arun and S. Mohanrajan, "Effect of Partial Shading on Vehicle Integrated PV System," 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2019, pp. 1262-1267
- [7] Hassam ur Rehman, Timo Korvola, Rinat Abdurafikov, Timo Laakko, Ala Hasan, Francesco Reda, "Data analysis of a monitored building using machine learning and optimization of integrated photovoltaic panel, battery and electric vehicles in a Central European climatic condition", *Energy Conversion and Management*, Volume 221, 2020
- [8] Django Mathijsen, The role of composites in getting the solar car to our driveways: Lightyear one, *Reinforced Plastics*, Volume 65, Issue 4, 2021, Pages 178-187, ISSN 0034-3617
- [9] T. Sarkar, M. Sharma and Suresh Kumar Gawre, A generalized approach to design the electrical power system of a solar electric vehicle, 2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, Bhopal, India, 2014, pp. 1-6
- [10] Ratil H. Ashique, Zainal Salam, Mohd Junaidi Bin Abdul Aziz, Abdul Rauf Bhatti, Integrated photovoltaic-grid dc fast charging system for electric vehicle: A review of the architecture and control, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 69, 2017, Pages 1243-1257
- [11] Mohamad Azlan Hussin, A. N. Abdalla, R. Ishak, R. Abdullah and Zailini Mohd Ali, Study on improving electric vehicle drive range using solar energy, *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, Kuantan, Malaysia, 2011, pp. 373-376
- [12] Abdelhamid, M., Pilla, S., Singh, R., Haque, I., and Filipi, Z. (2016) A comprehensive optimized model for on-board solar photovoltaic system for plug-in electric vehicles: energy and economic impacts. *Int. J. Energy Res.*, 40: 1489– 1508
- [13] A. Bedir, B. Ozpineci and J. E. Christian, The impact of plug-in hybrid electric vehicle interaction with energy storage and solar panels on the grid for a zero energy house, *IEEE PES T&D 2010*, New Orleans, LA, USA, 2010, pp. 1-6
- [14] Ehsani M., Gao Y., Gay S.E. and Emadi A. "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles", CRC PRESS, 2004
- [15] C. Mahmoudi, A. Flah and L. Sbita, An overview of electric Vehicle concept and power management strategies, 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Tunis, Tunisia, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/CISTEM.2014.7077026.
- [16] Yamaguchi, M., Ozaki, R., Nakamura, K., Lee, K., Kojima, N., Ohshita, Y., Masuda, T., Okumura, K., Satou, A., Nakado, T., Yamada, K., Araki, K., Ota, Y., Nishioka, K., Takamoto, T., Zushi, Y., Tanimoto, T., Thiel, C., Tsakalidis, A. and Jäger-Waldau, A. (2022), Development of High-Efficiency Solar Cell Modules for Photovoltaic-Powered Vehicles. *Sol. RRL*, 6: 2100429
- [17] Miri, I, Fotouhi, A, Ewin, N. Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. *Int J Energy Res*. 2021; 45: 501– 520.
- [18] Hongqian Wei, Yan Zhong, Likang Fan, Qiang Ai, Wenqiang Zhao, Rui Jing, Youtong Zhang, Design and validation of a battery management system for solar-assisted electric vehicles, *Journal of Power Sources*, Volume 513, 2021, 230531, ISSN 0378-7753
- [19] Kum, Dongsuk. (2010). Modeling and Optimal Control of Parallel HEVs and Plug-in HEVs for Multiple Objectives.

STM32 Tabanlı Sensörsüz BLDC Motor Sürücü Tasarım ve Uygulaması

Ahmet Bahadır, Ahmet Fenercioğlu

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğabilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

ÖZET

Günümüzde yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimi nedeniyle fırçasız doğru akım (BLDC) motorları geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, STM32 tabanlı hem sensörlü hem de sensörsüz kontrol yeteneğine sahip bir BLDC motor sürücü sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Sistem, 6-Adım komütasyon yöntemiyle temel PWM sinyalleri üzerinden kontrol edilmiştir. Geliştirilen sürücü devresi, 36V 350W'lık bir teker içi hub motor üzerinde test edilmiştir. Yapılan uygulama sonucunda, motorun kararlı şekilde çalıştığı ve sensörsüz kontrol altyapısının başarıyla oluşturulduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: BLDC Motor, STM32, Sensörsüz Hız Kontrolü, BOOTSTRAP Tekniği, RCD Bastırıcı Devre.

I. GİRİŞ

Fırçasız doğru akım (BLDC) motorları, yüksek verimlilikleri, sessiz çalışmaları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle günümüzde birçok endüstriyel ve mobil uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu motorların verimli şekilde sürülebilmesi için rotor konumunun hassas biçimde algılanması gerekmektedir. Konum tespiti için alan etkisi sensörleri gibi fiziksel algılayıcılar kullanılabilir. Bu sensörlerin sistem maliyetini artırması ve arıza riskleri gibi nedenlerle sensörsüz kontrol yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Sensörsüz BLDC motor kontrolünde, rotor konumu genellikle sargılardaki zıt elektromotor kuvveti (Zıt-EMK) sinyallerinin değerlendirilmesiyle tespit edilir [1].

Çalışmamızın temel amacı, BLDC motorların kontrolü ve sürülmesine yönelik teorik bilgilerin uygulamalı olarak tecrübe edilmesi, sistematik olarak raporlanması ve ileride geliştirilecek daha karmaşık kontrol yapıları için bir altyapı oluşturmaktır.

Çalışmamızda, STM32F401 mikrodenetleyicisi kullanılarak hem sensörlü hem de sensörsüz kontrol desteği sunan bir BLDC motor sürücü sistemi geliştirilmiştir. Sensörsüz kontrol için, gerilim bölücü dirençler ile faz gerilim seviyeleri düşürülmüş, sanal toprak noktası oluşturularak LM339 komparatör entegresi ile sıfır geçişler donanımsal olarak algılanmıştır. Komütasyon işlemi, uygulama açısından sade ve düşük işlem yükü gerektirdiği için 6-Adım yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. 33 Amper 100 Voltluk IRF540N MOSFET'ler kullanılmıştır.

MOSFET'lerin sürülmesinde BOOTSTRAP tekniği kullanılmıştır. Bu teknik, N-kanal MOSFET'in yüksek taraf sürülmesini sağlamak için, MOSFET'in gate ucuna, kaynak source ucundan daha yüksek bir voltaj uygulanmasını sağlar. Bunun için, bir diyot ve kondansatör ile oluşturulan BOOTSTRAP devresi, alçak taraf MOSFET her iletimdeyken kondansatörü şarj eder ve bu enerji, yüksek taraf MOSFET'i sürmek için kullanılır.

Yüksek taraf anahtarlarının verimliliği için tamamlayıcı PWM (complementary PWM) yöntemi tercih edilmiştir. Bootstrap tekniğini gerçekleştirmek üzere, maliyeti düşük ve piyasada yaygın olarak bulunan IR2101 gate driver entegresi kullanılmıştır.

IR2101 entegresinin girişleri ile Zıt-EMK çıkışları optik izolatör devreleri üzerinden izole edilmiş; kontrol ve güç katmanları arasında galvanik yalıtım sağlanmıştır. Kontrol

katmanının beslemesinde, izole bir DC-DC dönüştürücü kullanılmış ve akım ölçümü için ise alan etkili bir akım sensörü tercih edilerek hem ölçüm güvenliği artırılmış hem de sistemde tam bir katman ayrımı gerçekleştirilmiştir. MOSFET'lerin korunması için ise, kaçak endüktans kaynaklı gerilim sıçramalarını bastırmak amacıyla RCD bastırıcı devre kullanılmıştır. Geliştirilen sistem, 36V besleme altında çalışan 350W'lık bir hub motorla test edilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

II.1. 6-Adım Yöntemi ve Bootstrap Karakteristiği

Adım	1	2	3	4	5	6
U	+	+	Z	-	-	Z
V	-	Z	+	+	Z	-
W	Z	-	-	Z	+	+

Şekil 1: Faz anahtarlama matrisi [2]

6 Adım (trapezoidal) sürüş yönteminde, rotorun konumuna bağlı olarak her bir faz için belirlenen 6 farklı anahtarlama durumu üzerinden motor sürülür [2]. Bu yöntemde her bir faz üç farklı durumda olabilir: enerjilendirilir, toprağa çekilebilir veya yüzer durumda bırakılabilir. Bu şekilde fazlara sırasıyla enerji verilerek rotorun dönmesi sağlanır. Faz anahtarlama matrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu durumları gerçekleştirebilmek için her faz yarım köprü toplamda 3 tane yarım köprüsüyle sürülür.

Yüksek taraf MOSFET'ler doğrudan sürülemediği için kapı sürücü entegresi kullanılarak BOOSTRAP tekniği ile sürülecektir [3].

Kapı sürücü entegreleri BOOTSTRAP kapasitörünü şarj için Kullanarak, MOSFET'in iletimde olduğu sürede gate voltajının source voltajından BOOTSTRAP kapasitöründeki voltaj kadar fazla olmasını sağlar. Bu sayede MOSFET anahtarlama yapılabilir.

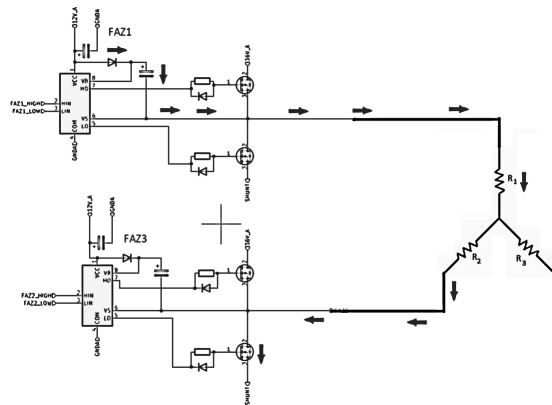
MOSFET sürmek için kullanılan BOOTSTRAP tekniğinde bir yarım köprü de düşük taraf MOSFET iletimde olduğu

durumda BOOTSTRAP kapasitörü şarj edilir ve yüksek taraf MOSFET sürüleceği zaman entegre üzerinden yüksek taraf MOSFET'i sürmekte kullanılır.

Kullanılan bu sürme yönteminde her PWM döngüsünde düşük tarafı aktif edip kapasitör şarj edilmiyor kapasitörün yük üzerinden şarj olması beklenmektedir. (Şekil2)

Rezistif yüklerde bu durum problem teşkil etmemektedir. Ancak yük endüktif olduğu için ters akımlar yüzünden kapasitörün tam dolması garanti edilemez ve tam dolmayan kapasitör yüksek taraf MOSFET’i tam olarak iletme geçiremeyebilir.

Şekil 2.a'da, tamamlayıcı PWM olmadan anahtarlanan entegrelerde BOOTSTRAP kapasitörünü şarj eden akımın izlemiş olduğu devre yolu gösterilmektedir ve bu yol indüktif yük üzerinden geçmektedir.



Şekil 2.a: PWM ile sürme akım yolu

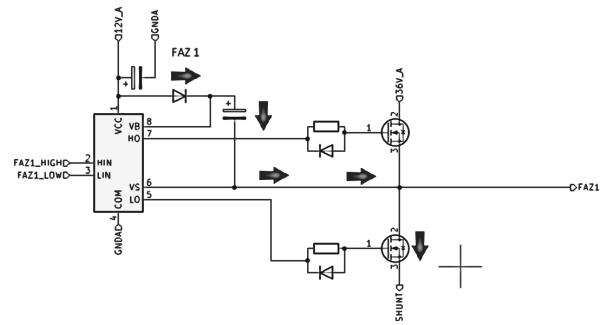


Şekil 2.b: PWM ile sürme anahtarlama sinyali

MOSFETLERİN tam olarak açılmadıkları durumda drain source direnci yüksek olacağı için MOSFET'lerin aşırı ısınması muhtemeldir.

Bu sebeple her PWM döngüsünde aynı hattın düşük taraf MOSFET’i kapalı zamanında aktif edilerek kapasitörün aynı yarım köprü üzerindeki düşük taraf MOSFET üzerinden dolmasını sağlayacak tamamlayıcı PWM ile sürme yöntemi geliştirilmiştir. (Şekil 3)

Şekil 3.a'te, tamamlayıcı PWM ile anahtarlanan devrede BOOTSTRAP kapasitörünü şarj eden akımın izlediği yol gösterilmektedir.

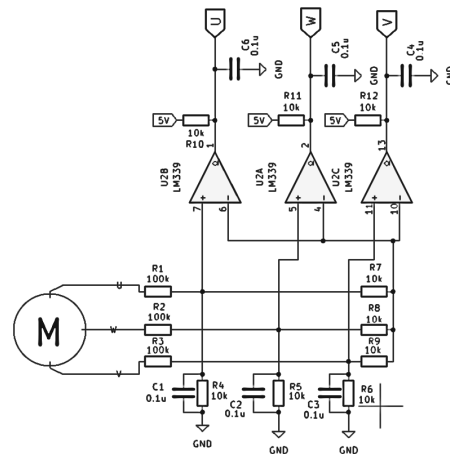


Şekil 3.a: Tamamlayıcı PWM ile sürme akım yolu



Şekil 3.b: Tamamlayıcı PWM ile sürme anahtarlama sinyali

II.2. Zıt-EMK Algılama ve Donanımsal Sıfır Geçiş



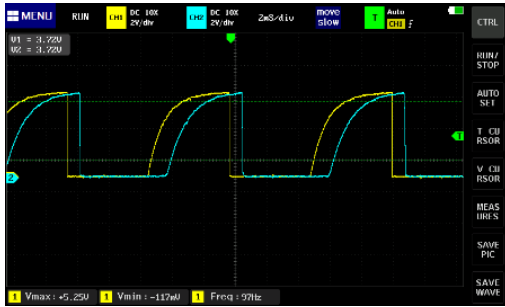
Şekil 4: Sıfır geçiş algılama devresi

Sensörsüz sürüş için kullanılan donanımsal sıfır geçiş (zero-crossing) algılama devresi, Şekil 4’de gösterildiği şekilde tasarlanmıştır. Faz gerilimleri, önce gerilim bölücü dirençler yardımıyla düşürülmekte, ardından 100 nF kapasitörler ile filtrelenerek yüksek frekanslı parazitlerden arındırılmaktadır. Filtrelenen faz sinyalleri, dirençler aracılığıyla yıldız bağlantı şeklinde birleştirilerek sanal bir yıldız noktası (sanal toprak) oluşturulmuştur [1]. Bu sanal yıldız noktasının gerilim seviyesi, karşılaştırma yapmak amacıyla LM339 karşılaştırıcı (komparatör) entegresinin referans girişine uygulanmaktadır. Karşılaştırıcıların diğer girişlerine ise filtrelenmiş faz gerilimleri bağlanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda faz geriliminin pozitif ya da negatif bölgede olup olmadığı tespit edilmekte ve çıkışta 0 V veya 5 V seviyesinde dijital sinyaller elde edilmektedir. Bu dijital sinyaller yardımıyla rotorun konumu tespit edilerek sensörsüz komütasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5’e

mavi ile gösterilen gerilim seviyesi düşürülmüş ve filtrelenmiş faz sinyali ile bu faza ait karşılaştırmalı çıkışı Şekil 5’de sarı ile gösterilmektedir.



Şekil 5: Zıt-EMK sinyalleri



Şekil 6: Zıt-EMK ve Alan etkisi sensörü faz farkı

Şekil 6’da fazdan algılanan Zıt-EMK sinyali ile Alan etkisi sensöründen elde edilen sinyaller arasındaki faz farkı gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan motorda hall sensörler faz sargılarının tam merkezine değil, iki bobin arasına yerleştirilmiştir. Bu durum, hall sensör sinyalleri ile motorun gerçek rotor konumu (Zıt-EMK) arasında elektriksel faz farkı oluşmasına neden olmuştur. [4] Texas Instruments’ın uygulama notunda belirtildiği üzere bu tür yerleşimlerde yaklaşık 30° elektriksel faz farkı oluşabilir.

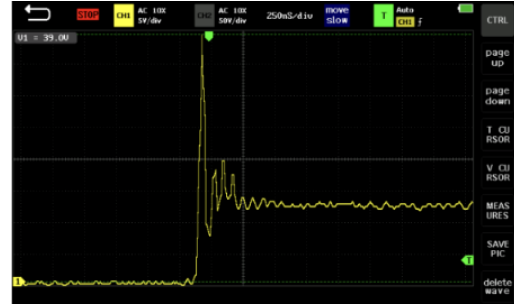
Motorun faz farkından kaynaklı sensörlü sürüşte sensörsüz sürüşe göre akustik gürültüsünün daha fazla olduğu ve aynı PWM doluluğunda daha düşük hızda çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu durum sistemde uygun yazılımsal faz kaydırma yöntemleriyle telafi edilmelidir. İlerleyen süreçlerde bu durum üzerinde durulması hedeflenmektedir.

II.3. MOSFET Koruması ve RCD Bastırıcı Devre Kullanımı

Sürücü devresinde testler sırasında sıkça karşılaşılan sorunlardan biri, MOSFET’lerin anahtarlama anında arızalanması olmuştur. Bu sorunu incelemek amacıyla, besleme gerilim seviyesi 12V’a düşürülerek faz çıkışlarındaki dalga formları osiloskop yardımıyla gözlemlenmiştir. Yapılan ölçümlerde, MOSFET’in anahtarlama sırasında faz voltajında kısa süreli ve yüksek genlikli gerilim pikleri oluştuğu tespit edilmiştir. Bu piklerin, MOSFET’in maksimum dayanma gerilimini aştığı ve bu nedenle elemanların zarar gördüğü anlaşılmıştır.

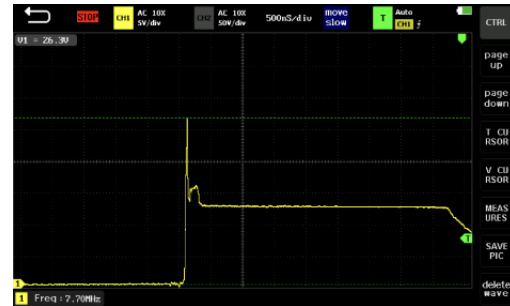
Gerilim piklerinin temel nedeni, anahtarlama anında devreden geçen akımın çok hızlı değişmesi (di/dt) sonucunda, devrede bulunan kaçak endüktanslar ve parazitik kapasiteler üzerinde yüksek genlikli gerilimlerin indüklenmesidir [5]. Yapılan ölçümlerde, faz geriliminin anahtarlama esnasında 0V’tan 12V’a geçmeden önce

yaklaşık 40V seviyelerine kadar yükseldiği ve bu yükselişi takip eden bir osilasyonla nominal seviyeye oturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7).

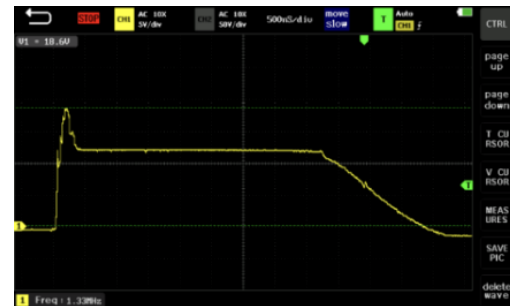


Şekil 7: Bastırıcı devre olmayan anahtarlama sinyali

Bu sorunu gidermek amacıyla RC (direnç-kapasite) ve RCD (direnç-kapasite-diyot) tipinde bastırıcı devresi ile test edilmiştir. Direnç ve kondansatör değerleri deneysel olarak elde edilen 100nF ve 15Ω değerleri tercih edilmiştir. RC bastırıcı devresi ile gerilim pikleri 27V seviyelerine düşürülmüş (Şekil 8), RCD bastırıcı devre uygulandığında ise bu değer 19V seviyelerine kadar inmiştir (Şekil 9). RCD bastırıcı devre filtresinin daha etkili sonuç verdiği gözlemlenmiş ve sistemde bu yapı tercih edilmiştir. RCD bastırıcı devrenin daha etkili olmasının temel nedeni, dirence paralel bağlı olan diyotun, anahtarlama sırasında oluşan ani gerilim yükselmelerinde hızlıca iletme geçerek akımı doğrudan kondansatöre yönlendirmesidir [5]. Bu sayede direnç devre dışı bırakılır (by-pass edilir) ve enerji daha kısa sürede sönmülenir. Böylece gerilim tepe noktaları RC bastırıcıya göre daha hızlı ve etkili bir şekilde bastırılır.



Şekil 8: RC bastırıcı devre ile filtrelenmiş anahtarlama sinyali

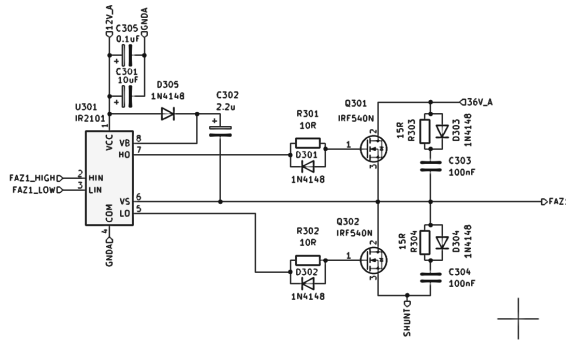


Şekil 9: RCD bastırıcı devre ile filtrelenmiş anahtarlama sinyali

III. SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI

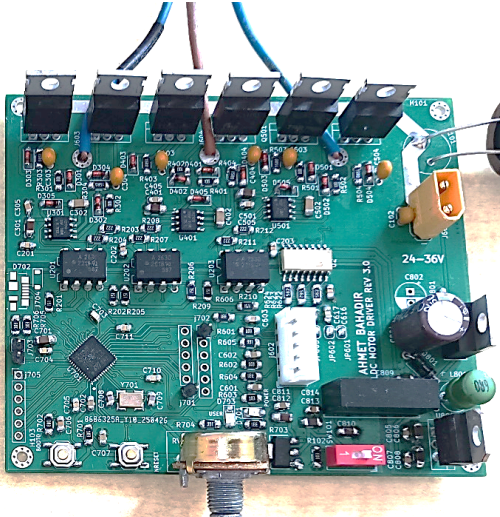
Sürücü devresinin şematik ve PCB tasarımı için KiCAD

programı kullanılmıştır. Yarım-köprü yapısına ait devre şeması Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10: Yarım köprü devre şeması

Tasarımda dört katmanlı bir PCB yapısı tercih edilmiştir. Katmanlar sırasıyla sinyal – referans – referans – sinyal şeklinde düzenlenmiş olup, bu yapı ile hem sinyal bütünlüğü hem de elektromanyetik girişim (EMI) açısından daha kararlı bir devre elde edilmesi amaçlanmıştır. Sürücü kartının PCB yerleşimi Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11: 3D PCB Tasarımı

IV. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen bu çalışmada, STM32 tabanlı bir BLDC motor sürücü sistemi geliştirilmiş ve hem sensörlü hem de sensörsüz kontrol yapısı desteklenmiştir. Sistem, donanımsal olarak LM339 komparatör entegresi kullanılarak Zıt-EMK tabanlı sıfır geçiş algılama ile çalıştırılmış, temel 6-Adım komütasyon yöntemiyle sürülmüştür. Yapılan testlerde, sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı ve sensörsüz kontrolün başarıyla uygulandığı gözlemlenmiştir.

Devre üzerinde karşılaşılan MOSFET arızaları, yapılan analizler sonucu anahtarlama anında oluşan yüksek gerilim piklerine bağlanmış ve bu sorun, RCD Bastırıcı devre kullanılarak etkin şekilde giderilmiştir. Bununla birlikte, optik izolatör ve izole DC-DC dönüştürücü ile kontrol ve güç katmanları arasında galvanik izolasyon sağlanarak sistem güvenliği artırılmıştır.

Sistem henüz tam yük altında test edilmemiştir; yüksüz olarak yapılan testlerde sürücü ve motor tam hızda 18 Wh

enerji tüketmektedir. Sistemin yük altındaki kararlılığı doğrulanmış, fakat yük altındaki verimi ileride yapılacak testlerle değerlendirilecektir.

Zıt-EMK tabanlı sensörsüz kontrol yapısında, faz Zıt-EMK voltajı motorun yıldız noktası referans alınarak elde edilmektedir. Ancak motorların çoğunda yıldız noktası dışarı verilmediğinden, yaygın olarak sanal yıldız noktası oluşturularak bu voltaj elde edilmektedir. Bu amaçla, sinyalleri işlemek için voltaj bölücüler ve düşük geçiş filtreleri kullanılmaktadır. Ancak düşük geçiş filtresi, sıfır geçiş tespiti için faz gecikmesine neden olmakta ve özellikle düşük hızlarda düşük sinyal/gürültü oranı, yüksek hızlarda ise aşırı faz gecikmesi gibi sorunlara yol açmaktadır [6]. Bu nedenle, geleneksel Zıt-EMK algılama yönteminin yalnızca dar bir hız aralığında verimli çalıştığı bilinmektedir. Mevcut çalışmada kullanılan motorun hız aralığında bu sınırlamalar bir sorun teşkil etmese de ilerleyen süreçlerde sürücünün daha geniş hız aralığında çalışan motorlara uyum sağlayabilmesi için bu problemlerin üstesinden gelecek daha gelişmiş yöntemlerin araştırılması planlanmaktadır.

Çalışma sürecinde aynı zamanda PID tabanlı hız kontrol algoritması üzerinde geliştirme yapılmakta olup, tamamlandığında daha hassas bir hız kontrolü sağlanması hedeflenmektedir. Öte yandan, sensörsüz sürüşte motorun ilk hareketini başlatmak için gerekli olan kalkış algoritması henüz entegre edilmemiştir. Kısa süreli açık döngü komütasyonu ile kalkış yapmayı sağlayacak algoritma üzerine yazılımsal çalışmalar devam etmektedir. Gelecek aşamalarda, sistemin daha gelişmiş kontrol yöntemleriyle donatılması ve yük koşullarına uyumlu, optimize edilmiş bir sürücü haline getirilmesi amaçlanmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] STMicroelectronics. (2007). CD00043112 - Back-EMF detection during PWM on-time by ST7MC. STMicroelectronics. https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00043112-back-emf-detection-during-pwm-on-time-by-st7mc-stmicroelectronics.pdf
- [2] Texas Instruments. (2020). Designing with high-side gate drivers. <https://www.ti.com/lit/slyp711>
- [3] Deveci, F. (2016). Dikkat: High side gate driver kullanımı. <https://www.firatdeveci.com/dikkat-high-side-gate-driver/>
- [4] Texas Instruments. (2015). Single versus three Hall sensor configuration for BLDC motors (Application Report No. SLAA695). <https://www.ti.com/lit/an/slaa695/slaa695.pdf>
- [5] 320volt.com. (2010). Snubber devresi nedir ve nasıl çalışır? <https://320volt.com/snubber/>
- [6] Shao, J., Nolan, D., & Hopkins, T. (2002). A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives. In Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (Vol. 1, pp. 33–37). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APEC.2002.989224>
- [7] Altium Resources. (2021). How to build an advanced brushless motor controller. <https://resources.altium.com/p/build-advanced-brushless-motor-controller>

Radyo Frekans Saldırılarında Araç Kiti Güvenliği

Hasan Yıldırım, Cansu Noberi

İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, otonom araçların radyo frekans (RF) tabanlı iletişim sistemlerindeki güvenlik açıklarını ve bu açıklara karşı geliştirilen şifreleme tabanlı bir çözümü incelemektedir. HackRF One ve GNU Radio kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, şifresiz RF sistemlerinin sinyal yakalama ve tekrar oynatma saldırılarına karşı tamamen savunmasız olduğunu ve bu saldırıların araç kapılarının yetkisiz açılmasını sağladığını ortaya koymuştur. Önerilen çözüm, dinamik şifreleme anahtarı, sinyal kimlik doğrulama ve tekrar oynatma önleme mekanizmalarıyla bu açığı kapatmış; aynı saldırı senaryolarında kapıların kilitli kalmasını sağlamıştır. Bu yenilikçi yaklaşım, otonom araçların RF iletişim güvenliğini artırarak otomotiv endüstrisine ve akademik literatüre katkı sunmakta; gelecekte farklı frekans bantları ve karmaşık saldırı türleri üzerinde yapılacak araştırmalarla daha da geliştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Otonom Araçlar, Radyo Frekans (RF) Güvenliği, Sinyal Yakalama Ve Tekrar Oynatma, Şifreleme Tabanlı Çözüm.

I. GİRİŞ

Otonom araçlar, modern ulaşım teknolojilerinde çığır açan bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. İnsan müdahalesi olmadan çalışabilen bu araçlar, güvenlik, verimlilik ve konfor gibi avantajlar sunarak otomotiv sektöründe devrim yaratmayı vaat etmektedir[1]. Bu araçların işleyişi, sensörler, iletişim sistemleri ve karmaşık algoritmalar gibi bir dizi teknolojik bileşene dayanmaktadır[2]. Özellikle kablosuz iletişim sistemleri, otonom araçların uzaktan izlenmesi, araçlar arası iletişim ve anahtarsız giriş gibi temel işlevlerini mümkün kılmaktadır. Bu sistemler genellikle kablosuz iletişimde düşük maliyetli ve uzun mesafeli veri aktarımı sağlayan radyo frekans (RF) dalgalarını kullanmaktadır[3]. Ancak, radyo frekans dalgalarının uzaktan kontrolü ve haberleşmeyi kolaylaştırmasının yanı sıra ciddi güvenlik açıklarını beraberinde getirmektedir. Çünkü RF dalgaları, elektromanyetik doğaları gereği, kötü niyetli kişiler tarafından kolayca yakalanabilir, manipüle edilebilir veya tekrar kullanılabilir[4]. Buna örnek olarak anahtarsız giriş sistemleri, araç kapılarını kilitlemek veya açmak için genellikle 433 MHz gibi belirli ve sabit frekans bantlarında çalışan RF sinyalleri kullanmaktadır. Bu sinyaller, çoğu zaman yeterli güvenlik önlemleri olmadan iletilmektedir[5]. Dolayısıyla, yazılım tabanlı sinyal işleme (Software-Defined Radio (SDR)) imkanı sunabilen cihazlarla, otonom araçların kilit sistemlerinde haberleşilen radyo dalgalarına saldırılar yapılabilmektedir. Bu saldırılara karşı aracın kilit sisteminin savunmasız durumda olması ile araca erişim mümkün olmaktadır.

Bu çalışma, otonom araçların RF tabanlı saldırılara karşı savunmasızlığını ele almakta ve bu riskleri azaltmak için yenilikçi bir şifreleme tabanlı çözüm önermektedir. Araştırmanın temel amacı, piyasada bulunan araçlar kullanılarak bu tür saldırıların uygulanabilirliğini göstermek ve RF iletişimini güvence altına alacak etkili bir karşı önlem geliştirmektir. Bu bağlamda, otonom araçların iletişim sistemlerinin güvenliğini artırmak için pratik ve uygulanabilir bir yaklaşım sunulurken, hem akademik literatüre hem de endüstriye katkı sağlanması amaçlanmıştır.

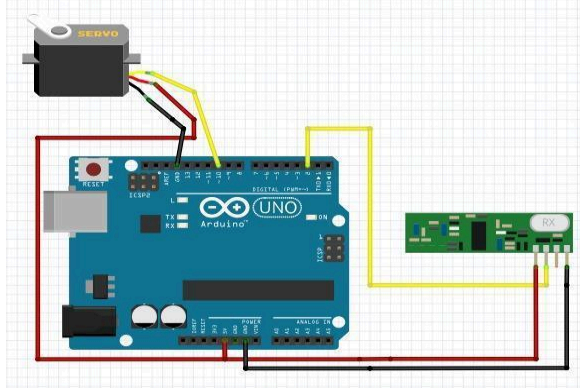
II. MATERYAL

Bu çalışmada, otonom bir aracın anahtar fobunun RF iletişimi ile kapı kilitleme sistemi arasındaki güvenlik açıklarını araştırmak ve çözümlmek için kapsamlı bir deneysel tasarım uygulanmıştır. Araştırma, iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir: (1) sinyal yakalama ve tekrar oynatma saldırısı yoluyla güvenlik açığının gösterilmesi ve (2) şifreleme tabanlı bir çözümün geliştirilip test edilmesi olmaktadır.

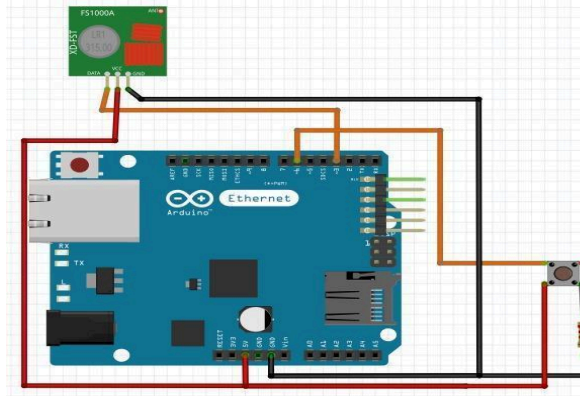


Şekil 1: 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak elde edilen prototip otonom araç

Araç Simülasyonu: Otonom bir aracı temsil eden fiziksel bir model, 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model, 433 MHz frekansında çalışan bir RF alıcı modülü ile donatılmış ve kapı kilitleme mekanizmasını kontrol edecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2: Araç kilit fobu



Şekil 3: Anahtar kilit fobu

Anahtar Fob Simülasyonu: Bir Arduino mikrodenetleyicisi ve RF verici modülü kullanarak özel bir anahtar fob geliştirilmiştir. Bu fob, düğmelere basıldığında araçla iletişim kurarak kilitleme ve açma komutlarını RF sinyalleri aracılığıyla gönderecek şekilde programlanmıştır.



Şekil 4: HackRF One

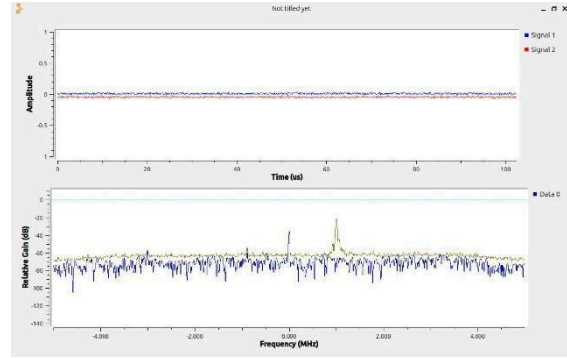
Saldırı Araçları: HackRF One SDR cihazı ve GNU Radio açık kaynaklı sinyal işleme yazılımı, RF sinyallerini yakalamak, analiz etmek ve tekrar oynatmak için kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan bu araçlar, düşük maliyetli ve erişilebilir olmaları nedeniyle gerçek dünyadaki tehditleri simüle etmek için seçilmiştir.

III. SİNYAL SALDIRISININ UYGULANMASI

İlk aşamada, RF iletişiminin güvenlik açığı, sinyal yakalama

ve tekrar oynatma saldırısı ile kanıtlanmıştır. Bu süreç aşağıdaki adımları içermiştir.



Şekil 5: Yakalanan sinyal grafiği

Sinyal Yakalama: HackRF One, 433 MHz frekansında alıcı modunda çalıştırılmıştır. Anahtar fobun “aç” düğmesine basıldığında gönderilen RF sinyali, GNU Radio kullanılarak yakalanmış ve kaydedilmiştir.

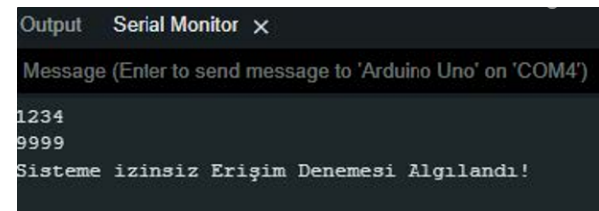
Sinyal Analizi: Yakalanan sinyal, GNU Radio’da ayarlanan parametreler (örneğin, 433 MHz frekans, RF kazancı, IF kazancı ve BB kazancı vb.) üzerinden işlenerek analiz edilmiştir. Bu parametrelerin doğru yapılandırılması, sinyalin kaydedilmesi ve tekrar oynatılabilmesi için önem arz etmektedir.

Sinyal Tekrar Oynatma: Kaydedilen sinyal, HackRF One’in verici modu kullanılarak araca geri gönderilmiştir. Bu tekrar oynatılan sinyal, yetkisiz bir açma komutunu simüle etmek amacıyla aracın RF alıcısına yönlendirilmiştir.

Bu saldırı, aracın kapılarının, orijinal anahtar fob kullanılmadan yalnızca tekrar oynatılan sinyalle açılmasıyla başarılı bir şekilde sonuçlanmıştır. Bu sonuç, otonom araçlarda kullanılan şifresiz RF iletişiminin ne kadar savunmasız olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

IV. SİNYAL SALDIRISINI ÖNLEYECEK ŞİFRELEME TABANLI ÇÖZÜM ALGORİTMASI

Tespit edilen güvenlik açığını kapatmak için, anahtar fob ile araç arasındaki iletişimi güvence altına alan bir şifreleme algoritması geliştirilmiştir. Bu çözüm, aşağıdaki temel özelliklere sahiptir:



Şekil 6: Şifrelenmiş kilit sistemine uygulanan saldırı sonucu

Dinamik Şifreleme Anahtarı: Her komut gönderildiğinde, önceden paylaşılan bir gizli anahtar ve zaman damgası temel alınarak benzersiz bir şifreleme anahtarı oluşturulur. Bu, her sinyalin farklı olmasını ve tekrar kullanılamamasını sağlamaktadır.

Sinyal Kimlik Doğrulama: Araçtaki alıcı, gelen sinyali çözmek ve doğruluğunu aynı gizli anahtar ile kontrol etmek

üzere programlanmıştır. Yalnızca kimlik doğrulaması geçen sinyaller işleme alınmaktadır.

Tekrar Oynatma Önleme Mekanizması: Algoritma, daha önce alınmış herhangi bir sinyali algılayıp reddedecek şekilde tasarlanmıştır. Bu, sinyal yakalansa ve tekrar oynatılsa bile saldırının başarılı olmasını engellemektedir.

Bu şifreleme algoritması, hem anahtar fob hem de araç alıcısı için Arduino platformunda uygulanmış ve gerçek zamanlı performans sağlanmıştır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma, otonom araçların radyo frekans (RF) tabanlı iletişim sistemlerindeki güvenlik açıklarını ve bu açıklara karşı geliştirilen şifreleme tabanlı bir çözümün etkinliğini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. HackRF One ve GNU Radio gibi erişilebilir araçlarla gerçekleştirilen deneyler, şifresiz RF sistemlerinin sinyal yakalama ve tekrar oynatma saldırılarına karşı tamamen savunmasız olduğunu göstermiştir. Şifreleme uygulanmadan önce, tekrar oynatma saldırıları araç kapılarının yetkisiz açılmasını sağlamış; ancak önerilen şifreleme çözümü, dinamik şifreleme anahtarı, sinyal kimlik doğrulama ve tekrar oynatma önleme mekanizmalarıyla bu güvenlik açığını başarıyla kapatmıştır. Şifreleme algoritması uygulandıktan sonra yapılan çoklu denemelerde, aynı saldırı senaryoları kapıların kilitli kalmasını sağlayarak başarısız olmuş; araç alıcısı, tekrar oynatılan sinyalleri güvenilir bir şekilde reddetmiştir. Ayrıca, nicel analizde şifreleme ve çözme işlemlerinin sistem performansına ihmal edilebilir bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu yenilikçi ve maliyet-etkin yaklaşım, otonom araçların RF iletişim güvenliğini artırarak hem akademik literatüre hem de otomotiv endüstrisine önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, farklı frekans bantları ve karmaşık saldırı türleri üzerinde bu çözümün etkinliğini test ederek otonom araçların güvenilirliğini daha da güçlendirebilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2016). Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 1-18.
- [2] Francillon, A., Danev, B., & Capkun, S. (2011). Relay attacks on passive keyless entry and start systems in modern cars. In *Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Department of Computer Science.
- [3] Alrabady, A. I., & Mahmud, S. M. (2005). Analysis of attacks against the security of keyless-entry systems for vehicles and suggestions for improved designs. *IEEE transactions on vehicular technology*, 54(1), 41-50.
- [4] Koscher, K., Czeskis, A., Roesner, F., Patel, S., Kohno, T., Checkoway, S., ... & Savage, S. (2010, May). Experimental security analysis of a modern automobile. In *2010 IEEE symposium on security and privacy* (pp. 447-462). IEEE.
- [5] Lu, M., Wevers, K., & Van Der Heijden, R. (2005). Technical feasibility of advanced driver assistance systems (ADAS) for road traffic safety. *Transportation Planning and Technology*, 28(3), 167-187.

Dinamik Raf Sistemli Servis Robotu

Abdurrahim Çalışkan, Mehmet Fatih Çebi, Miraç Mehmet Çelik, Rabia Yaren Güneş, Kerem Şahin, Hatice Ece Uluç, Mine Ak, Arif Solmaz, Kürşat Tanrıver

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, gelecekteki robotik servis sistemlerine katkı sağlaması hedeflenen bir servis modeli tasarlanmıştır. Robot, güvenlik kameralarından aldığı görüntü verilerini kullanarak masaların doluluk durumunu analiz etmekte ve siparişi aldığı masaya yönelmektedir. Bu sürecin, yapay zekâ algoritmaları ile optimize edilerek en verimli yönlendirmeyi sağlaması hedeflenmektedir. Robotun en önemli yeniliklerinden biri, dinamik raf sistemidir. Servis öncesinde aktifleşen bu sistem, rafları masa hizasına getirerek müşterilerin ayağa kalkmadan tepsiye kolayca ulaşmasını sağlamaktadır. İlk raf boşaldığında, tavan kısmındaki boşluğa doğru yükselmekte; ardından ikinci raf, birinci rafın önceki konumuna yükselerek geçmekte ve servis edilmektedir. Diğer raflar için de aynı işlem sırasıyla gerçekleşmektedir. Servis tamamlandığında ise tüm raflar kendi başlangıç konumlarına dönmektedir. Bu mekanizma sayesinde servis sırasında oluşabilecek kazaların önlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, robota entegre edilecek POS cihazı ile ödeme işlemlerinin yapılabilmesi mümkündür. Sistem tasarımı tamamlanmış; uygun profiller seçilmiş, yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve tekerlek tork hesaplarına göre uygun servo motorlar belirlenmiştir. Sistemin yazılım kısmı geliştirme aşamasındadır.

Anahtar kelimeler: Otonom Robot, Servis Robotu, Dinamik Raf Sistemi, Hizmet Süresi Optimizasyonu, Akıllı Servis.

I. GİRİŞ

Dünya genelinde milyonlarca insan, kafe ve restoranlarda yemek hizmeti almaktadır. Türkiye'de ise 128.000'den [1] fazla gıda hizmeti noktası bulunmaktadır. Ancak, restoranlarda ortalama 15 ila 30 dakika [2] arasında değişen bekleme süreleri, müşteri memnuniyetini olumsuz etkilemekte ve işletmelerin verimliliğini düşürmektedir. Bu çalışma, restoranlarda yaşanan uzun bekleme sürelerinin ve insan gücüne olan yüksek bağımlılığın yol açtığı verimlilik kaybını azaltmak amacıyla, çevresel algılama ve görsel veri işleme yeteneklerine sahip otonom bir servis robotu geliştirmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen sistem, gerçek zamanlı karar mekanizmaları ile hizmet süreçlerini optimize ederek işletme performansını artırmayı amaçlamaktadır. Yemek hizmetlerinde otomasyonu mümkün kılan teknolojilerin başında robotik sistemler, yapay zekâ ve görüntü işleme gelmektedir. Bu teknolojilerin hızlı gelişimi, endüstriyel otomasyon, depo yönetimi, lojistik ve servis sistemleri gibi birçok alanda köklü değişimlere yol açmaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu yalnızca fiziksel işleri otomatikleştirmekle kalmamakta; aynı zamanda çevresel algılama, karar verme ve etkileşim gibi yüksek düzey bilişsel görevlerin de makineler tarafından yerine getirilmesini mümkün kılmaktadır.

Aşağıda konuya ilişkin literatürde yer alan bazı çalışmalar sunulmuştur:

Fan ve ark. [3] sağlık tesislerinde hizmet veren mobil robotların SLAM tabanlı görsel algılama sistemleri ile donatılmasının iç mekânda güvenli gezinme yeteneklerini artırdığını belirtmiştir. RGB ve derinlik kameralarının birlikte kullanımı, robotların yalnızca harita oluşturmakla kalmayıp çevresel değişikliklere hızlıca uyum sağlamasına olanak tanımaktadır.

Surmann ve ark. [4] otonom robotlarda gerçek zamanlı nesne algılama sistemlerinin kullanımı üzerine yaptıkları çalışmada, robotların çevresel farkındalığını artırmak ve görev başarı oranlarını yükseltmek için görsel veriye dayalı makine öğrenmesi modelleri önermiştir. Bu yaklaşımlar, özellikle kullanıcı ile etkileşim gerektiren görevlerde yüksek başarı oranları sunmaktadır.

Literatürde sunulan çalışmalar, robotik sistemlerin çevresel algı, veri analizi ve karar verme becerilerinin birleşiminden yararlanarak daha verimli hale gelebileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, görüntü işleme, robotik hareket sistemleri, haritalama, yapay zekâ ve kullanıcı arayüzlerinin entegre edildiği çok katmanlı bir otomasyon çözümü içeren çok katmanlı bir servis robotu sistemi önerilmektedir.

Geliştirilen sistem, otonom hareket, görüntü işleme, karar destek ve insan-robot etkileşimi modüllerini bir araya getiren bir mimariye sahiptir. Bu yaklaşım yalnızca restoran servis süreçlerinde değil; aynı zamanda otonom lojistik ve akıllı depo yönetimi gibi çeşitli alanlarda da uygulanabilirlik potansiyeli taşımaktadır. Sistem entegrasyonunun tamamlanmasıyla birlikte, servis süresinde %30–50 oranında azalma sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, birden fazla robotun aynı mekânda paralel görev alabilmesi sayesinde, hizmet süreçlerinde daha yüksek verimlilik elde edilmesi beklenmektedir.

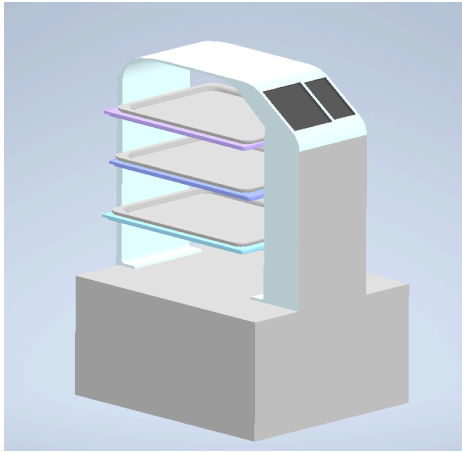
II. MALZEME VE METOT

II.1. Malzeme

Servis robotunun şase kısmına 30x30' luk 6063 Serisi Alüminyum malzemeden sigma profil seçimi yapılmıştır. Aracın esneklik ve manevra kabiliyetini sağlamak için OwnMy 2 ADET 15 cm Kauçuk teker seçilmiştir. Robotun

ana karkası bittikten sonra ABS Plastik kapatma işlemleri için kullanılması planlanmaktadır.

Ayrıca, robotun taşıma ve konumlandırma sisteminde Lineer Kızak Arabalı Raf Sistemi kullanılacaktır. Bu sistem, tamamen lineer motorlar üzerine kurulu çift eksenli bir hareket mekanizmasına sahiptir. Dikey ve yatay düzlemlerde konumlandırılan lineer ray ve kızak yapıları sayesinde, her bir raf hem yukarı-aşağı hem de ileri-geri doğrusal olarak hareket ettirilebilmektedir. Bu yapıda motorlar aracılığıyla raflar istenen yüksekliğe otomatik olarak ayarlanmakta ve ardından yatay düzlemde ilgili kullanıcı pozisyonuna yönlendirilmektedir. Bu özellik, tepsinin doğrudan kullanıcının erişebileceği en uygun konuma getirilerek hızlı ve ergonomik bir servis sağlanmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 1: Servis robotunun genel görünümü ve dinamik raf sisteminin yerleşimi.

Projede kullanılan başlıca elektronik donanımlar şunlardır: Raspberry Pi 4 (8GB), NVIDIA Jetson Nano JNX30D, Arduino Uno, LiDAR sensörü, IMU (MPU6050), DC-DC Dönüştürücü (LM2596s), JGA25-370 Redüktörlü DC Motor ve L298N Motor Sürücü Kartı.

Raspberry Pi 4 8GB ve JNX30D NVIDIA Jetson Nano
NVIDIA'nın Jetson platformu, robotik projelerde derin öğrenme uygulamalarını hızlı bir şekilde çalıştırmaya imkân verir. Bu özellikleri sayesinde, özellikle kamera görüntülerinin işlenmesi ve robotun çevresini algılaması gereken görevlerde Jetson Nano tercih edilmektedir [5]. Raspberry Pi 4, ROS 2 altyapısı ve genel sistem yönetimi için kullanılacak, ayrıca sensörlerden veri alacak ve robotun alt modülünü kontrol edecektir [6].

Arduino Uno

Arduino Uno, sensörlerden gelen verilerin işlenmesi ve motor sürücü kartına gerekli sinyallerin gönderilmesi için kullanılacaktır. Düşük seviye kontrol görevleri (örneğin tekerleklerin dönüşü) Arduino ile gerçekleştirilecektir [7].

LiDAR Sensörü

LiDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, robotun çevresindeki engelleri ve serbest alanları tespit etmek için kullanılmaktadır. Lazer ışınları aracılığıyla mesafeler ölçülerek, robotun çevresi üç boyutlu bir harita üzerinden algılanmaktadır [8]. Bu sensör, robotun doğru ve güvenli bir şekilde hareket etmesine olanak tanımaktadır. Proje kapsamında, LiDAR sensörü, robotun hedef masaya yönlendirilmesinde hayati bir rol üstlenmektedir.

IMU MPU6050

Bu sensör, robotun yönelimini ve hareketini ölçmek için kullanılır. İçindeki 3 eksenli jiroskop ve ivmeölçer sayesinde robotun denge takibi yapılmaktadır [9].

DC-DC Converter LM2596s

Bu modül, farklı bileşenlerin ihtiyaç duyduğu düşük voltaj seviyelerini sağlamak için kullanılır. Özellikle motorlar ve mikrodenetleyiciler sabit voltajda çalışması gerektiği için regülasyon görevi görmektedir [10].

JGA25-370 Redüktörlü DC Motor ve L298N Motor Sürücü Kartı

Motorlar yüksek tork gerektiren uygulamalar için uygun olup, servis robotunun ağırlığını taşıyabilecek güçtedir. L298N sürücü kartı, bu motorların yönünü ve hızını kontrol etmekte kullanılmaktadır.

II.2. Metot

Tasarım için Solidworks programı öğrenci versiyonu kullanılmıştır. Servis robotunun ana taşıyıcı karkası için Catia V5 yapısal analiz modülü ve Ansys Workbench Yapısal analiz modülü öğrenci versiyonu kullanılmıştır.

Projede kullanılan başlıca yazılım ve simülasyon araçları şunlardır: ROS, OpenCV, TensorFlow, PyTorch, Gazebo, RViz, SLAM ve Nav2

ROS

ROS, robotlar için geliştirilen açık kaynaklı bir yazılım altyapısıdır. Ubuntu üzerinde çalışır; Python ve C++ gibi dilleri desteklemektedir. Yayın-abone (publish-subscribe) modeliyle modüler bir yapı sunar, bu sayede farklı bileşenler kolayca iletişim kurabilmektedir [11]. Robot, mevcut restoran altyapılarıyla uyumlu şekilde ROS2 ile geliştirilecektir. Restoran içindeki kameralarla masaların doluluk durumu anlık olarak tespit edilecek, bu verilerin işlenmesinin ardından robot, alacağı komutla servise başlayarak verimliliği artıracak, müşteri memnuniyetini yükseltecek ve iş gücü maliyetlerini azaltacaktır.

OpenCV

OpenCV, robotun çevresel algılamasında ve görüntü işleme aşamalarında kullanılan açık kaynaklı bir kütüphanedir [12]. Robot, güvenlik kameralarından aldığı görüntülerle masaların doluluk durumunu ve çevresel engelleri tespit etmektedir. Nesne tanıma ve harita verisi eşleştirme işlemleriyle, robot doğru şekilde hedef masayı bulur ve otonom bir şekilde servis sağlamaktadır.

TensorFlow ve PyTorch

Bu projede, nesne tanıma ve çevresel analiz için derin öğrenme kütüphaneleri olan TensorFlow ve PyTorch kullanılmıştır. Bu araçlar, robotun güvenlik kameralarından gelen görüntüleri işleyerek masaların doluluk durumunu, engelleri ve hedef masaları tanıyabilmesini sağlamaktadır [13].

Eğitim ve Sınıflandırma: TensorFlow ve PyTorch, robotun görsel verileri doğru şekilde analiz edebilmesi için eğitilmiş derin öğrenme modellerini içermektedir. Bu modeller, robotun kamera verilerini anlamlı bilgilere dönüştürmesine olanak tanımaktadır.

Gazebo ve RViz (Simülasyon ve Görselleştirme Araçları)

Gazebo: Gazebo, robotların sanal ortamda test edilmesi için kullanılan güçlü bir simülasyon platformudur [14]. Bu proje,

robotun çevresel algılamasını ve hareket kontrolünü test etmek için Gazebo kullanılmaktadır.

RViz: RViz, ROS 2 ile uyumlu olarak robotun hareket ve çevresel algılamasını gerçek zamanlı görselleştiren bir araçtır [15].

SLAM ve Nav2 Entegrasyonu

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), robotun çevresini algılayarak harita oluşturmada ve aynı anda konumunu belirlemesini sağlar [16]. Proje kapsamında, robot, LiDAR sensörü ve kameralarla çevresindeki haritayı çıkarır, böylece engelleri doğru şekilde tespit eder. Nav2 (Navigation 2) ise bu haritayı kullanarak robotun güvenli bir şekilde rota belirlemesini ve engellerden kaçınarak hedefe ulaşmasını sağlar [17].

II.3. Karar Mekanizması

Makine gerçek zamanlı karar verirken üç mesafe bilgisini kullanır: robotun bulunduğu konumdan mutfığa kalan mesafe A, robotun bulunduğu konumdan yeni sipariş masasına olan mesafe B ve bu masadan mutfığa olan mesafe C. İki alternatif rota süresi şöyle hesaplanır:

$$T_{devam} = \frac{A+2C}{v} \quad T_{sapma} = \frac{B+C}{v}$$

Burada v , robotun hareket hızı; küçük bir sensör/hesaplama toleransı ε de eklenir. Eğer $T_{sapma} + \varepsilon < T_{devam}$ ise robot "sapma" rotasını seçer; aksi hâlde "devam etme" rotasını sürdürür. Böylece sistem, en kısa sürede servis sunacak biçimde kendi rotasını belirler.

Gerçek operasyon koşullarında mekânsal yoğunluk, engeller veya tek yönlü koridorlar gibi faktörler A, B ve C mesafe parametrelerinin efektif değerlerinde değişkenliğe yol açabilir. Bu etkilerin nicel olarak belirlenmesi ve modelin saha performansının doğrulanması amacıyla ileri çalışmalarda kapsamlı saha testleri gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Tablo 1: Çözüm Önerileri

Zorluk	Çözüm Önerisi
Sırada bekleyen Kullanıcı sayısı fazla olabilir	Robot başına 3-4 kullanıcıya Hizmet verecek şekilde tasarım genişletilmeli.
Yemeğin dökülmesi / taşması	Raflarda kenar yüksekliliği Artırılmalı, seçilen yüzeyin sürtünme katsayısı yüksek olmalı.
Robotun herhangi bir engel ile karşılaşma durumu	Sesli uyarı + sensör tabanlı Yönlendirme eklenebilir.

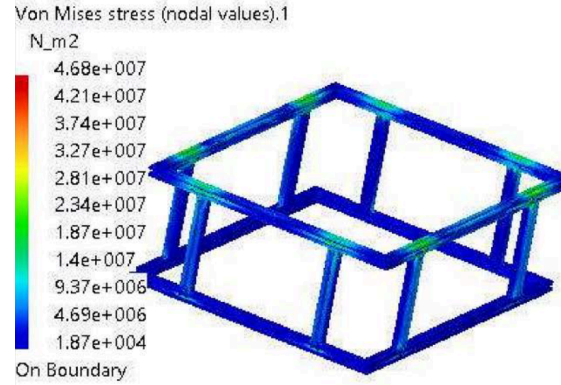
III. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın temel amacı, kullanıcının yaş, deneyim veya teknik bilgi düzeyine bakılmaksızın, sesli ve yazılı komutlarla doğal bir şekilde etkileşime geçebileceği sezgisel ve erişilebilir bir kullanıcı arayüzü geliştirmektir. Sistem; görsel algılama (güvenlik kameraları), önceden tanımlanmış masa-konum verilerinin harita eşleşmesi, motorlu zincirli raf ile fiziksel taşıma ve yapay zekâ destekli karar verme algoritmalarının çok katmanlı entegrasyonu sayesinde,

çevresel değişkenlere dinamik biçimde yanıt vererek motorlu raf mekanizmasını hedef masaya otonom ve hassas bir şekilde yönlendirir.

III.1. Mekanik Yapı Analizi

Bu projede sistemin en altında bir karkas sistemi yapılmıştır. 6063 Serisi 30x30 ölçülerinde Alüminyum sigma profilden tasarlanan robotun taşıyıcı karkas sistemine sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizde 162972 düğüm ve 89358 eleman seçilmiştir. Von- Mises Sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2: Sonlu elemanlar analiz sonucu.

Buna göre maksimum gerilme 46,8 MPa ($4,68 \times 10^7 \text{ N/m}^2$) çıkmıştır. 6063 Serisi Alüminyum malzemenin Akma dayanımı 200 MPa [18] olduğundan karkasımızı 4,27 kat daha emniyetli çıkarmıştır.

Ayrıca projenin tasarımı süresince karşılaşılabilecek problemler için çözüm önerileri sunulmuştur. Çözüm Önerileri Tablo 1' de görülmüştür.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, restoran gibi hizmet sektörlerinde otonom robotik çözümlerin etkinliğini artırmak amacıyla bir servis robotu tasarlanmış ve geliştirme süreci başlatılmıştır. Mevcut aşamada, çalışmalar robotun temel işlevselliği, çevresel algı kabiliyeti ve mekanik tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan ilk testler ve gözlemler, sistemin yazılım ve donanım bileşenlerinin entegrasyon sürecinin ilerlemekte olduğunu ve hedeflenen senaryolara uygun biçimde çalışabilmesi yönünde olumlu bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Gelecek aşamalarda, yapay zekâ tabanlı otonom servis uyarı sisteminin entegre edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, sistemin Gazebo ve RViz gibi simülasyon ve görselleştirme araçları kullanılarak dijital ortamda test edilmesi ve elde edilen simülasyon verileriyle performans değerlendirmesi yapılması hedeflenmektedir. Bu gelişmelerin ardından, robotun saha testleri gerçekleştirilecek ve gerçek ortam koşullarında hizmet süreçlerine entegrasyonu sağlanacaktır.

İlerleyen aşamalarda, geliştirilen robotun gerçek restoran ortamlarında saha testlerine tabi tutulması planlanmaktadır. Bu testler sonucunda, sistemin gerçek dünya koşullarındaki performans verileri toplanacak ve servis süresi, hata oranı, kullanıcı memnuniyeti gibi metrikler üzerinden değerlendirme yapılacaktır. Bu sayede, yalnızca teorik ve simülasyon düzeyinde değil, pratik kullanım açısından da

sistemin etkinliği somut biçimde ortaya konabilecektir. Ayrıca bu çalışmanın diğer çalışmalar için temel bir örnek oluşturması için ağırıda bulunmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] İiz, D. (2021). Food Service- Hotel Restaurant Institutional. 11(1), 290.
- [2] Bank of America. <https://business.bofa.com/en-us/content/restaurant-industry-report.html> (19.07.2024)
- [3] Fang, B., Mei, G., Yuan, X. ve Wang, L. (2021). Visual SLAM for Robot Navigation in Healthcare Facility.
- [4] Surmann, H., Pauly, M., Finke, M. ve Liang, N. (2012). Real-Time Object Detection for Autonomous Robots.
- [5] NVIDIA Corporation. (2020). Jetson Nano Developer Kit Getting Started Guide.
- [6] Raspberry Pi Foundation. (2021). Raspberry Pi 4 Model B Documentation.
- [7] Banzi, M. ve Shiloh, M. (2014). Getting Started with Arduino.
- [8] Zhang, J. ve Singh, S. (2014). Loam: Lidar odometry and mapping in real-time. Proceedings of the Robotics: Science and Systems Conference (RSS).
- [9] InvenSense. (2013). MPU-6050 Product Specification.
- [10] Texas Instruments. (2004). LM2596 Simple Switcher Power Converter Datasheet.
- [11] Martinez, A. ve Fernandez, E. (2013). Learning ROS for Robotic Programming.
- [12] Bradski, G. ve Kaehler, A. (2008). Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media.
- [13] Abadi, A. M., Agarwal, A., Barham, P. ve diđerleri. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 265–283.
- [14] Open Source Robotics Foundation.. Gazebo:The robot simulation tool. <https://gazebosim.org/> adresinden alındı (2024).
- [15] Open Source Robotics Foundation. (2024). RViz: 3D visualization for ROS. <http://wiki.ros.org/rviz> (16.05.2018)
- [16] Durrant-Whyte, H. ve Bailey, T. (2006). Simultaneous localization and mapping: Part I. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(2), 99–110.
- [17] Macenski, S., Bhat, S. ve Kormushev, P. (2020). Navigation 2: The ROS2 navigation stack. Journal of Robotics and Automation, 38(2), 45–58.
- [18] Karakaya, C. ve Ekři, S. (2022). Oluklu ekirdekli Sandviç Panellerin Deformasyon Davranışı zerine Simulasyon alışması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 9(2), 843–852.

Enkaz Altı Mikro Kurtarma Kolu Tasarımı (EMOK)

Elif Demirtaş, Şeyma Karabacak, Merve Demir, Mine Ak, Arif Solmaz, Kürşat Tanrıver

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada 3D tasarım, yapısal, parametrik analizleriyle birlikte ele alınan bir robot kol tasarımı sunulmaktadır. Robot kolun tasarım aşamasından sonra ileri çalışmalarda dar alanlara girebilen, çok yönlü sensörlerle donatılmış ve çevresel algılayıcılarla entegre edilerek enkaz altındaki bireylerin yerinin tespit edebilen bir prototip imalatın yapılması hedeflenmektedir. Sistemin en önemli özelliklerinden biri işitme ve konuşma engelli bireylerle temel işaret dili aracılığıyla iletişim kurabilme yeteneğine sahip olabilmesidir. Böylece kurtarma ekiplerinden önce bireylerle temas kurarak bilgi aktarımı ve moral desteği sağlaması amaçlanmaktadır. Bunun için prototip öncesi büyük önem taşıyan tasarımda kapsamlı bir yapısal analiz ve parametrik yapılmıştır. Yapılan sonlu eleman analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme 65,355 MPa çıkmıştır. Buna göre robot kol iskelet malzemesi 3D yazıcılarla basılabilen PLA malzemesinden değil 2,52 kat daha güvenli olduğu hesaplanan alüminyum alaşım malzemenin kullanılması gerektiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: 3D Tasarım, Enkaz Tespiti, İşaret Dili, İşitme Engelliler, Robot Kol, Sensör Teknolojileri, Yapısal Analiz.

I. GİRİŞ

Doğal afetler, özellikle depremler, dünya genelinde en fazla can ve mal kaybına yol açan felaketlerin başında gelmektedir. Afet sonrası en kritik süreçlerden biri, zamanla yarışılan arama-kurtarma faaliyetleridir. Bu süreçte hem teknolojik hem de insani müdahalelerin koordineli ve etkili olması, hayatta kalan bireylerin kurtarılmasında büyük rol oynamaktadır. Ancak bazı durumlarda, geleneksel yöntemlerle erişilemeyen dar alanlar ya da insan sağlığını tehdit eden ortamlarda müdahale etmek oldukça zorlaşmaktadır. Bu noktada, robotik sistemlerin desteği giderek daha büyük önem kazanmaktadır.

Arama- kurtarma robotlarının genellikle enkaz altındaki bireyleri tespit etmeye, fiziksel engelleri aşmaya veya canlılık belirtilerini algılamaya yönelik geliştirildiği görülmektedir [1, 2]. Bu sistemlerde ses, sıcaklık veya gaz sensörleri gibi algılayıcılar yaygın olarak kullanılmakta ancak kullanıcıyla etkileşim kurma yetisi sınırlı kalmaktadır [3]. Özellikle işitme ya da konuşma engelli bireylerle doğrudan iletişim kurabilecek, işaret dili üzerinden bilgi aktarımı yapabilecek bir robotik kol sistemi literatürde rastlanmamıştır [4, 5]. Ayrıca, birçok sistem karmaşık, yüksek maliyetli ve üretimi zor mekanik yapılardan oluşurken; önerilen bu projede, dar alanlara girebilecek şekilde tasarlanmış kanca formunda bir robot kolun üretilmesi hedeflenmiştir.

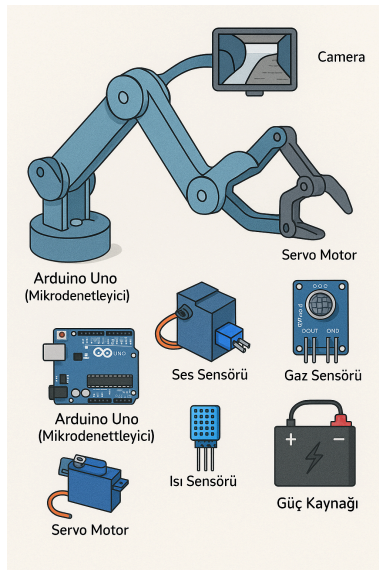
Bu çalışmada geliştirilen robot kol, 3 boyutlu yazıcı ile üretilen, ince yapısı sayesinde dar alanlara sarkıtılabilir. İleriki çalışmalarda alüminyum alaşımdan üretilmesi planlanan hafif gövdesi sayesinde, bir arama kurtarma personeli tarafından esnek bağlantı aparatı ya da kontrollü bir yönlendirme çubuğu yardımıyla dikkatli bir şekilde enkaz boşluğuna yerleştirilebilecektir. Kolun taşınabilir ve modüler yapısı, zorlu arazi koşullarında dahi etkili bir yönlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır. Böylece enkaz altındaki bireyle fiziksel temas olmadan bir iletişim aracı olarak işaret dili üzerinden etkileşim kurulması hedeflenmektedir [6, 7].

Bu bağlamda bu çalışmanın amacı deprem sonrası arama kurtarma ekiplerine bir robotik kol aracılığı ile yardım ederek hızlı ve güvenli şekilde enkaz altındakilere müdahale etmek olan bir robot kolun kapsamlı yapısal analizi ele alınmıştır. Böylece literatürdeki bir boşluğun doldurulması hedeflenmektedir [8]. Tasarım çalışması sonrasında prototipi yapılacak olan robot kol, kamera, gaz sensörü, ısı sensörü ve ses algılayıcı gibi çeşitli modüllerle donatılacaktır. Yalnızca insan tespitini değil; aynı zamanda çevresel koşullara dair bilgi toplayarak kurtarma ekiplerine ön bilgi sağlamayı amaçlamaktadır. Robot kolun uzaktan kontrol edilebilir yapısı sayesinde, fiziksel olarak erişilemeyen bölgelerdeki bireyler ve canlılara ulaşmak mümkün hale gelmektedir. Projenin en dikkat çekici ve yenilikçi yönlerinden biri, robot kolun işitme ya da konuşma engelli bireylerle iletişim kurmak üzere temel işaret dili hareketlerini uygulayabilecek şekilde programlanmış olmasıdır.

II. SİSTEM TASARIMI

Sistemin amacı, özellikle dar ve ulaşılması zor alanlarda etkili bir şekilde çalışabilecek, çevresel verileri algılayabilecek ve temel işaret hareketlerini gerçekleştirebilecek bir robotik kol ön tasarımının sunmaktır. Bu robot kolu, özellikle arama kurtarma operasyonlarında kullanılmak amacıyla tasarlanmış ve enkaz altındaki bireylere işaret dilinde iletişim kurma yeteneğine sahip olacak şekilde planlanmıştır [9, 10]. Tasarımda, çevre koşullarına ve dar alanlara uyum sağlayabilen, modüler ve taşınabilir özelliklere odaklanılmıştır [11]. Robot kolu, enkaz altındaki bireylerle temassız bir iletişim kurarak etkili bir kurtarma süreci sağlamak için gerekli özellikleri taşıyacaktır. Robot kolun tasarımı, üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen hafif ve dayanıklı parçalarla şekillendirilmiştir. Kol, parmaklar, eklem gibi mekanik bileşenlerle donatılmış ve çevresel verileri algılayabilen sensörler ile entegre edilmiştir. Her parmak, bireylerin işaret dilini algılayarak uygun işaretleri verebilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu projede, gerçek zamanlı işaret dili tanıma ve anlatma yeteneğine sahip, bir robot kola entegre edilmiş etkileşimli bir sistem gerçekleştirilecektir. Sistem,

MediaPipe kütüphanesi aracılığıyla kameradan alınan görüntülerdeki el iskeletini tespit ederek her karedeki 21 anahtar nokta koordinatını çıkarabilecektir [12]. Bu koordinatlar, önceden işaret dili verileriyle eğitilmiş ve Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modeline giriş yaparak harf veya kelime sınıflandırması gerçekleştirilmesi planlanmaktadır [13,14] Model eğitimi, Amerikan İşaret Dili (ASL) veri seti kullanılarak *TensorFlow* ortamında yapılacaktır [15]. Tanımlanan işaretler, *Python* üzerinden seri iletişimle bir Arduino kontrollü robot kola iletilerek fiziksel olarak işaret diliyle ifade edilebilmektedir [16]. Sistem ayrıca, metin girişlerini işaret dili hareket dizilerine çevirerek robot kol aracılığıyla anlatma işlevi de sunma yeteneğine sahip olması hedeflenmektedir. Bu uygulama, işitme ve konuşma engelli bireylerle insan- robot etkileşimini kolaylaştırmayı ve çift yönlü iletişim olanaklarını genişletmeyi amaçlamaktadır. Robot kol, özellikle dar ve zor ulaşılabilir alanlarda çalışabilecek şekilde tasarlanması öngörülmüştür. Kolun sarkıtılabilirliği, arama kurtarma personeli tarafından kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Kol, modüler kablo sistemleri veya robotik taşıyıcı mekanizmalar aracılığıyla enkaz altına sarkıtılabilir şekilde tasarlanmıştır. Kolun yönlendirilmesi, manuel ya da uzaktan kumanda sistemleriyle sağlanabilir, böylece kol, dar alanlarda bile doğru şekilde kullanılabilir. Tasarlanan EMOK robot kolu sistem tasarımı Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1: EMOK Robot Kolu Sistem Tasarımı

Robot kolu tasarımı genel olarak robot kol gövdesi, kamera modülü, ses sensörü, ısı sensörü, gaz modülü, mikro denetleyici, servo motorlar ve güç kaynağı gibi parçalardan oluşturulması planlanmaktadır. Bu eklemeler yardımıyla EMOK işitme ve konuşma engelli bireylerin temel işaretleriyle iletişim yoluyla kurabilme yeteneğine sahip olacağı değerlendirilmektedir.

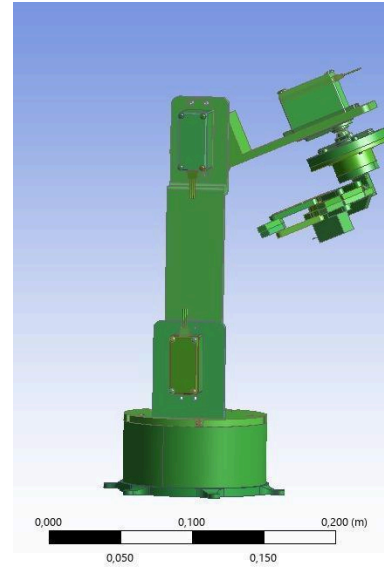
Gelecek çalışmalarda bu EMOK tasarımının prototipinin imal edilmesi ve testlerin yapılması planlanmaktadır. Bu sistem mekanik ve elektronik yapı olarak başlıklar halinde aşağıda detaylandırılacaktır. Mekanik Sistem, Gövde, hareketli mafsallar ve sisteminden oluşacaktır. Elektronik yapı ise mikrodenetleyici, sensörler, servo motorlar, kamera modülü ve güç kaynağından oluşturulması planlanmaktadır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Projenin temel amacı bir robotik kol yardımıyla deprem sonrası arama kurtarma ekiplerine yardım edilmesi ve hızlıca enkaz altındakilere müdahale edilmesidir. Robot kolun uzaktan kontrol edilebilir yapısı sayesinde, fiziksel olarak erişilemeyen bölgelerdeki bireylere ve canlılara ulaşmak mümkün hale gelmektedir [10]. Projenin en dikkat çekici ve yenilikçi yönlerinden biri, robot kolun işitme ya da konuşma engelli bireylerle iletişim kurmak üzere temel işaret dili hareketlerini uygulayabilecek şekilde programlanmış olmasıdır. Kullanıcıların sistemle anlamlı bir şekilde etkileşime girmesi ve verilen işaretleri doğru anlayabilmesi, projenin temel hedeflerinden biridir [15]. Benzer şekilde, Yamamoto ve Bakadura tarafından yapılan çalışmalarda da afet senaryolarında robotların insanlarla etkili iletişim kurabilmesinin önemi vurgulanmaktadır [17, 18].

III.1. 3D Tasarım

Tasarımın 3D modeli Solidworks programında yapılmıştır. EMOK 3D tasarım Şekil 2’ de gösterilmektedir.



Şekil 2: EMOK 3D Tasarım

III.2. Yapısal Analiz

Yapılan tasarım, sonlu elemanlar analizinin yapılması için Ansys Workbench yapısal modülüne aktarılmıştır. Analiz barada tasarımın yükü taşıyacak olan iskeletine yapılmıştır. Burada statik ve dinamik yükleri karşılayacak şekilde tasarlanarak iskeletin düz şekilde açıldığı anına 20N ve standart yerçekimi kuvveti uygulanmış ve sabitleme tabanından fixed Support seçilerek sabitleme yapılmıştır. EMOK kuvvet tanımı Şekil 3’ te gösterilmiştir.

A: Static Structural

Force

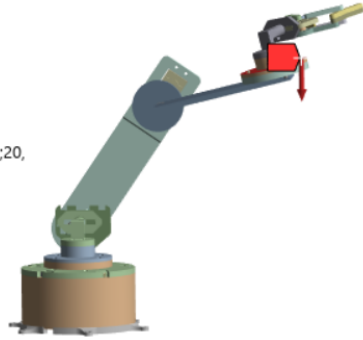
Time: 1, s

14.05.2025 13:25

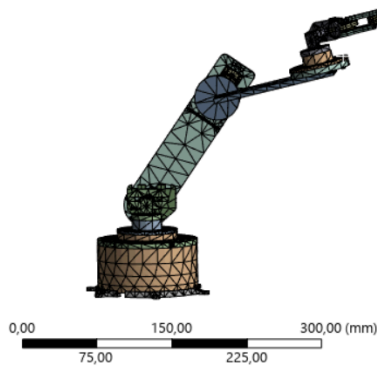


Force: 20, N

Components: 0,0,20,

**Şekil 3:** EMOK Kuvvet Tanımı

Modele malzeme ve mesh ataması yapılmıştır. Malzeme olarak, Ansys yapısal modülünde de tanımlı olan alüminyum alaşım seçilmiştir. Yapılan tasarım sabitleme tabanından sabitlenmiş, standart yerçekimi kuvveti ve 20N kuvvet uygulanmıştır. Mesh element size 4 mm, çözünürlük 1 olarak seçilmiştir. Analizde 17032 eleman ve 34334 düğüm seçilmiştir. Ardından modele Von-Mises gerilme analizi uygulanmıştır. Burada gerilme maksimum 64,215 MPa çıkmıştır. EMOK Tasarım Mesh görüntüsü Şekil 4 ve EMOK Von-Mises gerilme analizi Şekil 5'te gösterilmiştir.

**Şekil 4.** EMOK Tasarım Mesh görüntüsü**A: Static Structural**

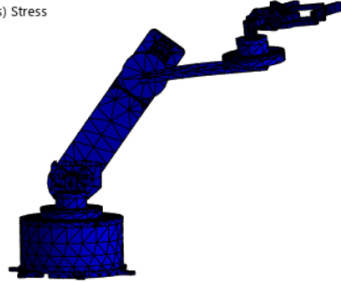
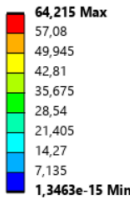
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1 s

14.05.2025 13:29

**Şekil 5.** EMOK Von-Mises Gerilme Analizi

Analiz sonuçlarının mesh eleman ölçüsüne göre değişimlerini ve hangi noktalarda meshten bağımsız hareket ettiğini görmek için 10 farklı tipte mesh eleman ölçüsü ve maksimum gerilme parametrik analizi yapılmıştır. Mesh eleman ölçüsü ve maksimum gerilme parametrik analizi Şekil 6' da gösterilmiştir.

Table of Design Points				
	A	B	C	D
1	Name	Update Order	P1 - Mesh Element Size	P2 - Equivalent Stress Maximum
2	Units		mm	MPa
3	DP 0 (Current)	1	6	62,701
4	DP 1	2	5,5	65,355
5	DP 2	3	4,5	64,878
6	DP 3	4	4	60,213
7	DP 4	5	3,5	65,108
8	DP 5	6	3	56,773
9	DP 6	7	2,5	56,816
10	DP 7	8	2	64,211
11	DP 8	9	1,5	63,825
12	DP 9	10	1	66,095

Şekil 6. EMOK Mesh eleman ölçüsü ve maksimum gerilme parametrik analizi

Buna göre 2 numaralı parametrik analize kadar mesh eleman ölçüsü azaldıkça maksimum gerilme parametrik analizi sonucu artış göstermektedir. 2 numaralı parametrik analizden 8 numaralı parametrik analizden kadar azalış göstermektedir. Ardından döngüsel olarak yükselişe geçmektedir. Burada mesh ölçüsünden bağımsız olarak maksimum gerilme değerinin 65,355 MPa olduğu ve hesaplamaların bu değere göre yapılması gerektiği görülmektedir.

Böylece sonlu eleman analiz sonuçlarına göre maksimum gerilme 6,355 MPa çıkmıştır. Robot kol iskelet malzemesi eğer PLA malzemesi olarak seçilirse PLA malzemesin akma dayanımı 56,5 MPa olduğundan tasarıma elverişli değildir. Robot kol iskelet malzemesi olarak alüminyum alaşım malzemesi kullanılır ise tasarıma daha uygun olacağı düşünülmüştür. Çünkü alüminyum alaşım malzemesinin akma dayanımı 164,80 MPa ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre maksimum 65,355 MPa olduğundan tasarıma daha uygun olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak, bu robot kol malzemesi alüminyum alaşım olursa yukarıda belirtilen şartlarda 2,52 kat daha emniyetli bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Bu oranın literatür çalışmalarıyla [20,21] uyumlu olduğu görüldüğünden ileri çalışmalarda imalat aşamasına güvenle geçilebileceği görülmüştür.

IV. SONUÇLAR

Bu proje kapsamında geliştirilen EMOK robot kol tasarımı afet bölgelerinde arama-kurtarma çalışmalarına yenilikçi bir bakış açısı sunmaktadır. Tasarım sonrasında robot kolun enkaz altında kalan iletişim engeli bulunan bireylerle bağlantı kurabilme ve canlıları kurtarma misyonunu yürütmesi planlanmaktadır. Özellikle tasarım sonrası ileriki çalışmalarda yapılacak imalat neticesinde EMOK iletme ve konuşma engelli bireylerin temel işaretleriyle iletişim yoluyla kurabilme yeteneğinin sahip olacak ve böylece klasik robotik sistemlerden ayrılmaktadır. Kamera, ses, ısı ve gaz sensörleri gibi donanımlarla zenginleştirilmiş sistem hem çevresel tehlikeleri algılayabilmekte hem de bireyin yaşamsal durumuna dair ilk bilgileri toplayabilecektir. Yapılan yapısal analizle ileri çalışmalarda imalat aşamasına güvenle geçilebileceği görülmüştür.

Yapısal analizler sonucunda, PLA malzeme ile yapılan prototipin mekanik dayanımı yetersiz bulunmuş; alüminyum alaşım malzeme ile tasarımın yaklaşık 2,2 kat daha emniyetli çalıştığı gösterilmiştir. Ayrıca mesh bağımsızlığı analizi ile optimum ağ yapısı belirlenmiş ve maksimum gerilme değeri 65,355 MPa olarak saptanmıştır. Bu değer, alüminyum alaşımın akma dayanımının oldukça altında kalmakta ve tasarımın güvenli çalışabileceğini doğrulamaktadır.

Gelecek çalışmalarda bu EMOK tasarımının imal edilmesi ve testlerinin yapılması planlanmaktadır. Prototip imalatı yapılacak bu sisteme daha gelişmiş işaret dili yetenekleri, sesli yanıt sistemleri veya doğal dili işleme algoritmaları entegre edilerek iletişim kabiliyeti artırılabilir. Aynı zamanda mobil taşıma sistemi eklenerek robotun manevra kabiliyeti geliştirilebilir. Bu proje sadece afet durumları için değil; iletişim engelli bireylerle etkileşimi temel alan birçok farklı alanda da örnek teşkil edebilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Murphy, R. R. (2004). Trial by Fire: Rescue Robots in Disaster Response. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(3), 50–61. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1325971>
- [2] Kitano, H. ve Tadokoro, S. (2001). RoboCup Rescue: A Grand Challenge for Multiagent and Intelligent Systems. *AI Magazine*, 22(1), 39–52. doi: 10.1609/aimag.v22i1.1542.
- [3] Bello, O. O., Obasanya, T. D. ve Adeniji, J. A. (2025). Design and Implementation of an Assistive Smart Glove for a Sign Language Recognition System. *International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering*, 12(2), 37–42. [Online]. Available: <https://www.ijercse.com/article/6%20February%202025%20IJERCSE.pdf>
- [4] Kumar, S. ve Singh, R. (2021). Robotic Arm for Sign Language Interpretation with Sentiment Analysis. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 12(10), 92–99. <https://www.ijera.com/papers/vol12no10/Ser-1/L12109299.pdf>
- [5] Project ASLAN. (2017). 3D-printed robotic arm translates speech into sign language. *Designboom*. <https://www.designboom.com/technology/sign-language-robot-project-aslan-08-23-2017/>
- [6] Wikipedia contributors. (2025, April 15). *Machine translation of sign languages*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Machine_translation_of_sign_languages
- [7] Pigou, L., Dieleman, S., Kindermans, P. J. ve Schrauwen, B. (2015). Sign language recognition using convolutional neural networks. *European Conference on Computer Vision*, 572–578.
- [8] Bulgarelli, A., Toscana, G., Russo, L. O., Farulla, G. A. ve Lippiello, V. (2022). Design and prototyping of a robotic hand for sign language using 3D printing. *Procedia CIRP*, 109, 437–442. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.073>
- [9] Liang, Y., Li, W., Wang, Y., Xiong, R., Mao, Y., ve Zhang, J. (2020). Dynamic Movement Primitive based Motion Retargeting for Dual-Arm Sign Language Motions. *arXiv preprint arXiv:2011.03914*. <https://arxiv.org/abs/2011.03914>
- [10] Lim, J., Sa, I., MacDonald, B. ve Ahn, H. S. (2023). A Sign Language Recognition System with Pepper, Lightweight-Transformer, and LLM. *arXiv preprint arXiv:2309.16898*. <https://arxiv.org/abs/2309.16898>
- [11] Siciliano, B. ve Khatib, O. (Eds.) (2016). *Springer Handbook of Robotics* (2nd ed.). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1
- [12] Zhang, F. (2020). MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking, *arXiv e-prints*, Art. no. arXiv:2006.10214, 2020. doi:10.48550/arXiv.2006.10214.
- [13] DeptAI Hand Tracker https://github.com/geaxgx/depthai_hand_tracker (Erişim Tarihi: 20/05/2025).
- [14] Gül, M. (2021). Representing American Sign Language Letters and Numbers with Humanoid Robot Arm. *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 4(2), 136–145. <https://doi.org/10.34088/kojose.882323>
- [15] Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., ... & Zheng, X. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. *12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16)*, 265–283. <https://www.usenix.org/system/files/conference/osdi16/osdi16-abadi.pdf> (Erişim Tarihi: 17/05/2025).
- [16] Maliki, R., Alhaidar, D., Attallah, K., Alsalem, S., Morris, M., & Tosunoglu, S. (2017). *Robotic hands to teach sign language*. In *Proceedings of the 30th Florida Conference on Recent Advances in Robotics* (pp. 1–7). Florida Atlantic University. <https://public.eng.fau.edu/design/ferar2017/papers/RoboticHandsSignLanguage.pdf> (Erişim Tarihi: 20/05/2025).
- [17] Yamamoto T. ve Nakamura, Y. (2015). Communication in Rescue Robotics: A Study on Human-Robot Interaction in Disaster Situations. *Journal of Field Robotics*, 32(6), 858–874. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21583>
- [18] Bello, O. O., Obasanya, T. D. ve Adeniji, J. A. (2025). Design and Implementation of an Assistive Smart Glove for a Sign Language Recognition System. *International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering*, 12(2), 37–42. [Online]. Available: <https://www.ijercse.com/article/6%20February%202025%20IJERCSE.pdf>
- [19] Zhang, F. (2020). MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking, *arXiv e-prints*, Art. no. arXiv:2006.10214, 2020. doi:10.48550/arXiv.2006.10214.
- [20] Sucuoğlu, H. S. (2025). DESIGN and DEVELOPMENT of ROVER MOBILE ROBOT with TOPOLOGY OPTIMIZATION and POWER ANALYSIS. *Innovative Approaches to Engineering Problems*, 1(1), 11–17.
- [21] Soleimani, A. (2024). The soft computing approaches in optimising multi-objective mechanical design of a weeding robot, *Smart Agricultural Technology*, 9, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100674>.

Hava Araçları için Katlanabilir Anten Tasarımı

Enes Aydın, Nur Hayat Karaman, Caner Sancak

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye
ÖZET

Bu çalışma, özellikle dar hacimli görev ortamlarında görev yapan hava araçları için geliştirilen, açıldığında iletişim verimliliğini artıran ve katlandığında minimum alan kaplayan bir anten sistemini tanıtmaktadır. Tasarımın temel amacı, görev dışında veya yerdeyken kompakt formda taşınabilen; görev anında ise açılarak geniş yüzey alanıyla maksimum performans sağlayan, modüler ve biyomimetik bir çözüm sunmaktır. Uğur böceklerinin kanat katlama yapısından esinlenilerek geliştirilen mekanizma, tek bir servo motorla çalışan kremayer-dişli ve çubuk sistemi ile gerçekleştirilmiş, açılma süresi 2 saniye ile sınırlandırılmıştır. Katlanabilirlik sayesinde hava aracının aerodinamik yapısı bozulmazken, açık konumda anten kazancı ve iletişim kabiliyeti artırılmıştır. Tasarım sürecinde yapılan analizler, sistemin hem mekanik dayanım hem de hareket kontrolü açısından güvenli ve etkin çalıştığını göstermektedir. Bu yapı, taşınabilirlik, düşük enerji ihtiyacı ve aerodinamik uyumluluğu bir araya getiren yenilikçi bir mühendislik çözümüdür.

Anahtar Kelimeler: Katlanabilir Anten, Biyomimetik, Mekanizma.

I. GİRİŞ

Havacılık sektörü başta olmak üzere birçok alanda hava araçlarının kullanım alanı hızla genişlemektedir. Bu gelişim, hava aracı sistemlerinin daha verimli, hafif, modüler ve fonksiyonel hale getirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle iletişim, yön bulma, veri aktarımı ve uzaktan komut sistemleri gibi görevlerde kullanılan antenler, hava aracının performansı ve görev başarısı açısından kritik bir rol üstlenmektedir. (Paracha et al., 2019) Ancak sabit yapılu antenler; hacim, ağırlık ve aerodinamik direnç gibi dezavantajlar oluşturarak sistem verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. (Liu, 2018; Mizrahi et al., 2024)

Bu bağlamda geliştirilen katlanabilir anten sistemleri, uçuş dışı durumlarda katlanarak minimal alan kaplaması; görev sırasında ise otomatik olarak açılarak maksimum performans sunmasıyla, modern hava aracı sistemlerinin ihtiyaçlarına önemli ölçüde cevap verebilmektedir. Bu projede tasarlanan anten sistemi, uğur böceklerinin kanat açma ve katlama mekanizmalarından esinlenerek geliştirilmiş; böylece biyomimetik bir yaklaşım benimsenmiştir. (Zhu & Cheng, 2018). Bu yaklaşım hem yapısal sadelik hem de işlevsel verimlilik açısından sağlam bir temel sunmaktadır. Katlanabilir anten sistemini taşıyan mekanik yapı, mühendislik açısından ayrı bir öneme sahiptir.

Tasarlanan mekanizma; çubuk mekanizmalar, kremayer-dişli sistemleri ve Servo motorlarla desteklenmiş, birbiriyle senkronize biçimde çalışan açılma-kapanma hareketlerine olanak sağlayacak şekilde modellenmiştir. Bu sistemin en temel özelliği, tek bir tahrik motoru ile çoklu hareketin sağlanabilmesidir. Böylece hem ağırlık hem de enerji tüketimi azaltılmış, sistem karmaşıklığı minimuma indirilmiş ve senkronize kanat açılımları ile dengeli, güvenilir bir yapı elde edilmiştir.

Tasarım sürecinde Solidworks gibi CAD tabanlı yazılımlar kullanılarak üç boyutlu modelleme yapılmış, sistemin mekanik ve kinematik analizleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Kritik bağlantı noktalarına yönelik kuvvet, hız ve açısal hız analizleri sonucunda tasarım üzerinde optimizasyonlara gidilmiş; böylece hem dayanım

hem de hareket sürekliliği açısından güvenli sınırlar içinde kalmıştır. Ayrıca mekanizmanın iki saniye içerisinde tam açılımı gerçekleştirecek şekilde çalışması sağlanmış ve bu sayede görev sırasında sistemin hızlı ve sorunsuz bir biçimde devreye alınabilmesi mümkün kılınmıştır.

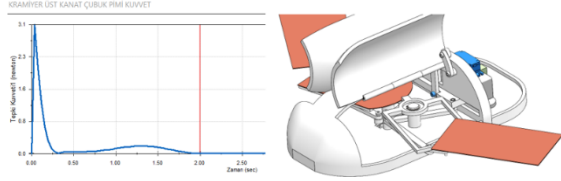
Prototip üretimi için 3D yazıcı teknolojisi tercih edilmiş; bu sayede düşük maliyetli ve hızlı üretim olanağı sağlanarak tasarım iterasyonları desteklenmiş, montaj ve test süreçlerinde esneklik elde edilmiştir. Servo motorların uygun yerlere entegre edilmesiyle mekanik sistem işlevsel hale getirilmiş ve saha testlerine uygun bir prototip oluşturulmuştur.

II. TASARIM VE ANALİZLER

Katlanabilir anten tasarımı, doğadaki kanat açılım mekanizmalarını örnek alan biyomimetik bir yaklaşımla geliştirilmiştir. Uğur böceklerinin kabuk altına gizlenebilen ve ihtiyaç halinde hızlıca açılabilen kanat yapısından esinlenerek oluşturulan sistem; kompakt, hafif ve mekanik olarak güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Tasarımın temel amacı, antenin katlandığında minimum hacim kaplaması, açıldığında ise maksimum iletişim yüzeyine ulaşmasıdır.

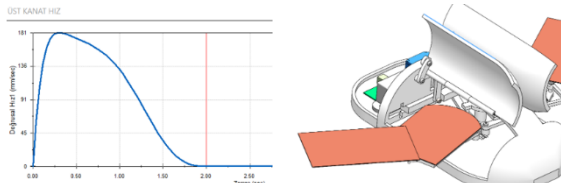
Mekanik tasarım süreci, SolidWorks yazılımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Antenin açılma ve kapanma hareketi, bir servo motor yardımıyla dönen dişli çarkın, doğrusal harekete çevrildiği bir kremayer ve ona bağlı çubuk mekanizması ile sağlanmıştır. Bu yapı sayesinde altı farklı kanat, yalnızca tek bir motorla eş zamanlı olarak açılabilir şekilde senkronize edilmiştir. Açılma süresi 2 saniye ile sınırlandırılarak, görev anında hızlı tepki verebilen bir sistem hedeflenmiştir. Tasarımın işlevselliğini doğrulamak amacıyla çeşitli mühendislik analizleri yapılmıştır:

Kuvvet Analizi: Sistem üzerindeki bağlantı pimlerine etki eden yükler incelenmiş, özellikle açılma hareketinin başlangıç anında yüksek kuvvetlerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu kritik bölgelerde tasarım değişiklikleri yapılarak kuvvet dağılımı dengelenmiştir.



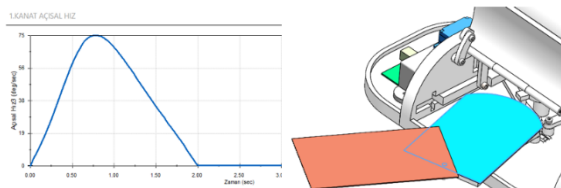
Şekil 1: Kremayer üst kanat çubuğu bağlantı pimi kuvvet analizi ve görüntüsü

Doğrusal Hız Analizi: Kanat uçlarının açılma sırasındaki hız profili analiz edilmiştir. Sistem, hızla ivmelenip belirli bir zirveye ulaştıktan sonra kontrollü biçimde yavaşlamaktadır. Bu durum mekanizmanın dinamik stabilitesini doğrulamaktadır.



Şekil 2: Üst kanat doğrusal hız analizi ve görüntüsü

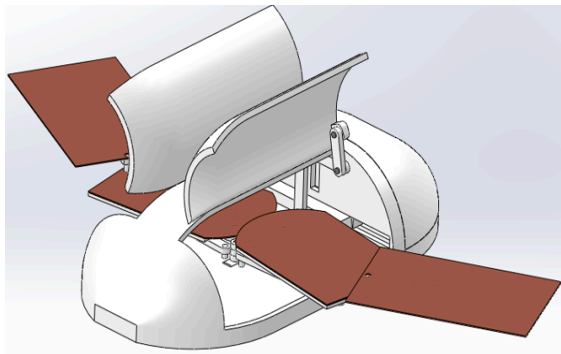
Açısal Hız Analizi: Her bir kanadın dönme hareketi sırasında gösterdiği açısal hız eğrileri incelenmiş ve mekanizmanın senkron çalıştığı tespit edilmiştir. Bu analizler, sistemin titreşim yaratmadan dengeli bir şekilde açıldığını göstermiştir.



Şekil 3: Kanat açısal hız analizi görüntüsü

Tasarımın modüler yapısı sayesinde farklı boyutlarda anten konfigürasyonlarına kolayca uyarlanabilmesi mümkündür. Ayrıca tüm parçalar 3D yazıcı ile üretilebilir şekilde modellenmiştir. Bu yönüyle hem prototip üretimi hem de seri üretime geçiş açısından maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır.

Yapılan tüm analizler, tasarımın saha koşullarında güvenli ve kararlı şekilde çalışabileceğini doğrulamaktadır. Sistem, düşük güç tüketimi ile hızlı ve kontrollü hareket kabiliyeti sunarak, modern hava aracı sistemlerine entegre edilebilecek niteliktedir.



Şekil 4: Mekanizmanın Açık Hali

III. SİSTEM YAPISI VE MEKANİZMA

Katlanabilir anten tasarımının temelinde, hareketin tek bir motor üzerinden tüm kanatlara senkronize olarak aktarılmasını sağlayan entegre bir mekanizma yapısı bulunmaktadır. Bu yapı, dişli-kremayer mekanizması ile başlayan ve bunu izleyen dört çubuk mekanizma zincirleri ile tamamlanan bir kinematik sistemden oluşmaktadır.

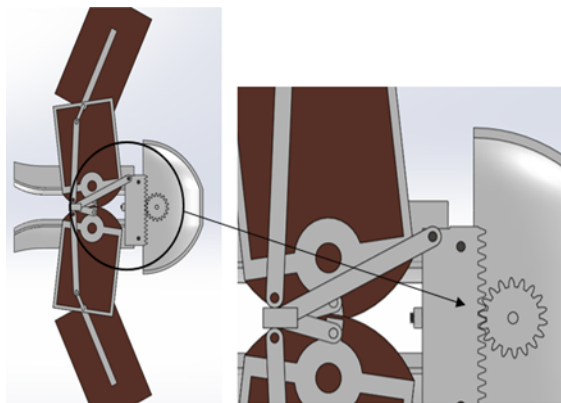
Sistemin sürücü elemanı olan servo motor, ilk olarak bir pinyon dişliye dönme hareketi uygular. Bu pinyon, doğrusal hareketi çevrilmek üzere bir kremayer dişli ile eşleştirilmiştir. Kremayer üzerindeki lineer hareket, her iki kanat bloğuna aynı anda yönlendirilir. Böylece merkezden dışa doğru eş zamanlı bir açılım sağlanır.

Kremayerin uç noktalarına bağlanan sistemde, dört çubuklu mafsallı mekanizma görev yapar. Bu mekanizma bir krank (hareketi alan çubuk), kol (hareketi aktaran bağlantı çubuğu), salınım kolu (kanadı döndüren kol) ve sabit bağlantı noktası ile tamamlanır. Dört çubuk mekanizması, lineer hareketi dairesel harekete çevirerek, kanatların belirlenen açıda ve sürede açılmasını sağlar. Bu yapı sayesinde sistemde hem hız hem de konum kontrolü hassas biçimde yapılabilmektedir.

Mekanizmanın tasarımında, her bir bağlantı kolunun uzunluğu ve mafsal konumları özel olarak optimize edilmiştir. Üst ve alt kanatlara ait kollar farklı çubuk oranlarına sahiptir; böylece açılma sırasında önce üst kanatlar, ardından alt kanatlar devreye girerek sistemin kademeli ve dengeli şekilde genişlemesi sağlanmıştır. Kanatların açılma açısı, çubukların dönme yarıçapı ve çarpışma önleme bölgeleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Tüm bu sistem boyunca hareket iletimi mekanik olarak sağlandığından, yazılımsal müdahaleye ihtiyaç duymadan güvenli çalışabilmektedir. Sistemde boşlukların ve sönümleme etkilerinin minimize edilmesi için bağlantı pimleri sık toleranslı seçilmiş, analizler doğrultusunda bazı bölgelerde malzeme kalınlıkları arttırılmıştır.

Sonuç olarak bu mekanizma, az sayıda hareketli parça, tek motorlu yapı, düşük enerji tüketimi ve yüksek mekanik verimlilik sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Aynı zamanda modüler yapısı sayesinde farklı anten boyutlarına kolayca uyarlanabilir bir sistemdir.



Şekil 5: Kremayer – Pinyon Dişli Mekanizması

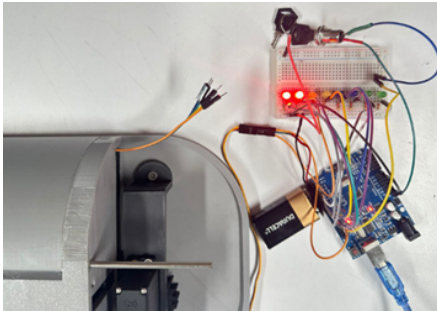
IV. ANTEN PERFORMANS TESTİ

Katlanabilir anten tasarımının yalnızca mekanik değil, aynı zamanda haberleşme performansı açısından da etkinliğini değerlendirebilmek amacıyla, sistemin açık ve kapalı konumlarında anten kazanç testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde temel amaç, katlanabilir yapının sinyal iletimine olan etkisini belirlemek ve tasarımın iletişim görevlerine uygunluğunu doğrulamaktır.

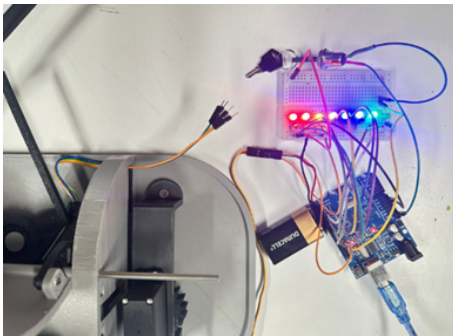
Testlerde, SX1262 tabanlı Lora haberleşme modülü kullanılmış ve sistemin veri alma/gönderme kapasitesi doğrudan ölçülmüştür. Anten olarak, 868–960 MHz ve 1710–2700 MHz frekans aralığında çalışan, 5 dBi kazançlı bir SMA anten tercih edilmiştir. Deney ortamında, sistem farklı konumlarda test edilerek sinyal şiddeti (RSSI) ölçümleri alınmış, özellikle açık ve kapalı konumlar arasındaki farklar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Test süreci boyunca, haberleşme mesafesi sabit tutulmuş ve yalnızca antenin fiziksel konumunun (açık veya kapalı) değiştirilmesine odaklanılmıştır. Ölçümler, aynı çevresel koşullar altında tekrar edilerek sonuçların güvenilirliği artırılmıştır.

Açık konumda gerçekleştirilen ölçümlerde, sinyal şiddeti ve veri iletim güvenilirliği önemli ölçüde artış göstermiştir. Sistemin kapalı pozisyondayken iletim performansında azalma görülmüş, bu da antenin katlı pozisyonunda yönsüz yayılım ve yetersiz açıklık sebebiyle zayıf performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Elde edilen verilere göre, açık pozisyonunda ölçülen anten kazancı belirgin şekilde artmış; bu durum antenler için yapının konumunun önemli bir etken olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 6 ve Şekil 7’de verilen test sonucu görsellerinde de görülebileceği üzere, açık pozisyon ile katlı pozisyon arasında kazanç açısından anlamlı bir fark oluşmuştur.



Şekil 6: Kapalı durumda gelen sinyal gücü



Şekil 7: Açık durumda gelen sinyal gücü

Bu doğrultuda, tasarlanan katlanabilir anten sisteminin yalnızca hacim ve ağırlık avantajı sunmakla kalmayıp, açıldığında iletişim kapasitesini aktif şekilde artıran bir yapıya sahip olduğu deneysel olarak da doğrulanmıştır. Bu sonuç, sistemin hava araçları gibi görev sırasında iletişim kalitesi kritik öneme sahip platformlarda etkili bir çözüm sunabileceğini göstermektedir.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda, katlanabilir mekanizmaya sahip, biyomimetik temelli bir anten sistemi başarıyla geliştirilmiş ve fiziksel prototipi üretilerek test edilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve analizler doğrultusunda, sistemin hem yapısal hem de fonksiyonel olarak tasarım hedeflerini karşıladığı görülmüştür.

Testler, mekanizmanın görev sırasında hedeflenen sürede (yaklaşık 2 saniye) tamamen açıldığını ve senkronize biçimde sorunsuz çalıştığını ortaya koymuştur. Servo motor tarafından kontrol edilen sistemde, hareketli parçalar arasında herhangi bir gecikme, takılma ya da senkronizasyon hatasına rastlanmamıştır. Bu da, mekanik tasarımın hem doğrusal hem açılabilir hareketler açısından güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Ayrıca, anten sisteminin açık ve kapalı konumlarındaki elektromanyetik performansı karşılaştırılmış; açık konumda, anten kazancında ve sinyal iletim kalitesinde anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu, açılabilir yapıların iletişim görevlerinde yalnızca yerden ve ağırlıktan tasarruf sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda haberleşme verimini de doğrudan etkilediğini kanıtlamaktadır.(Nguyo Gachahi, 2024).

Sonuç olarak, geliştirilen katlanabilir anten sistemi; üretilebilirliği, düşük maliyeti, mekanik bütünlüğü ve haberleşme performansı ile, insansız hava araçları başta olmak üzere çeşitli mobil platformlarda kullanılmaya uygun, uygulama potansiyeli yüksek bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 8: Prototipin kapalı hali



Şekil 9: Prototipin açık hali

VI. KAYNAKLAR

- [1] Liu, X., Origami Antennas for Novel Reconfigurable Communication Systems, Doktora Tezi, Florida International University, Miami, 2018.
- [2] Zhu, J. & Cheng, H. (2018). Recent Development of Flexible and Stretchable Antennas for Bio-Integrated Electronics. *Sensors*, 18(12),2018, 4364.
- [3] Paracha, K. N., Butt, A. D., Alghamdi, S. A., Babale, S. A. & Soh, P. J., Liquid Metal Antennas: Materials, Fabrication and Applications. *Sensors*,19(24), 2019, 5381.
- [4] Zhu, L. & Wong, K. K., Historical Review of Fluid Antenna and Movable Antenna. *Sensors*, 24(3), 2024, 1305.
- [5] Nguyo Gachahi, A., Revolutionizing Wireless Communication with Single Layer Capacitor-Based Antenna Technology. *Sensors*, 24(7), 2024, 4201.

Endüstriyel Otomasyon Sistemleri için Çoklu Haberleşme Protokollerini Destekleyen Gömülü Kontrol Kartı Tasarımı

Erkut Aksu, Halil Alpaslan

Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Denizli, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, endüstriyel ortamlarda güvenli, hızlı ve esnek haberleşme ihtiyacına cevap verebilecek nitelikte, UART, RS485, CAN ve I2C protokollerini destekleyen çok amaçlı bir kontrol kartı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kart üzerinde, iki kanallı röle ile çıkış kontrolü sağlanmakta ve çeşitli yüklerin doğrudan kontrolü mümkün hale gelmektedir. Kartın besleme girişinde yer alan, 24 V 3 A'ye kadar dayanabilen ve dış etkenlerden minimum düzeyde etkilenen bir endüstriyel gerilim regülatörü kullanılmıştır. Bu regülatör ile elektromanyetik parazitlerin yoğun olduğu zorlu endüstriyel koşullarda dahi kararlı bir çalışma performansı elde edilmektedir. Haberleşme altyapısı olarak CAN protokolü ile güvenli ve hızlı veri aktarımı sağlanırken, RS485 arayüzü üzerinden endüstriyel sahalarda yaygın olarak kullanılan MODBUS protokolü desteği de sağlanarak, uzun mesafeli ve çok noktalı iletişim ihtiyaçlarına çözüm üretilmiştir. Kart üzerindeki çoklu haberleşme protokolleri arasında geçiş yapılabilmesi, farklı sistemlerle etkileşimi kolaylaştırmakta ve esnek bir yapı sunmaktadır. Kullanıcı deneyimini artırmak amacıyla karta bütünleşmiş bir ekran birimi tasarlanmıştır. Bu ekran üzerinden veri alışverişi görselleştirilmekte; kullanıcı, olası arızaların hangi hatta veya modülde meydana geldiğini kolayca tespit edebilmektedir. Ayrıca kart, kendi türündeki diğer kartlarla haberleşme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, sistemin ölçeklenebilirliğini artırmakta ve ürünün kullanıcı dostu bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır. Geliştirilen sistem; otomasyon projelerinde, SCADA uygulamalarında ve I2C ekranlar ile bütünleşmiş çalışarak çeşitli endüstriyel kontrol senaryolarında etkin biçimde kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel kontrol kartı, CAN protokolü, RS485, UART, I2C, MODBUS, Elektromanyetik parazit, Röle kontrolü, SCADA, Otomasyon, Endüstriyel haberleşme, Veri izleme.

I. GİRİŞ

Sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte, endüstriyel uygulamaların önemi her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte, veri güvenliği, kararlı ve hızlı haberleşme altyapıları gibi alanlarda yeni gereksinimler oluşmaktadır. Özellikle modern endüstriyel sistemlerde, dayanıklı, esnek, güvenilir ve çok protokollü haberleşmeyi destekleyen elektronik sistemlerin kullanılması gerekli hale gelmektedir. Literatürde, ARM Cortex-M3 mikro denetleyicisi çevresel devre ve arayüze sahip bina otomasyon sistemi için CAN RS232/485 Ethernet STM32F107 donanımlarına sahip iletişim platformu tasarımı yer almaktadır [1]. Ayrıca, nesnelerin interneti (IOT) tabanlı endüstri uygulamalarına uygun bir kart tasarımı da mevcuttur [2]. Uzaktan müdahalenin önemi bilinmesine rağmen, zaman tasarrufu açısından arıza tespiti ve anında müdahalenin çoğu işletme açısından önemli olduğu unutulmamalıdır.

Bu nedenle, zaman tasarrufu dikkate alınarak endüstriyel ortamlarda kullanılmak üzere çoklu haberleşme arayüzleri sunan ve kullanıcı odaklı özelliklerle donatılmış bir kontrol kartı bu çalışmada geliştirilmiştir. IOT kullanılmaması tasarlanmış olan kontrol kartının maliyetini de düşürmüştür. Buna ek olarak, tasarım sürecinde hem donanımsal dayanıklılık hem de yazılımsal esneklik gözetilerek, kartın endüstriyel otomasyon sistemlerine doğrudan entegre edilebilir olması hedeflenmiştir.

II. YÖNTEM

Hedeflenen endüstriyel uygulamaların kapsamlı şekilde analiz edilmesi sonucunda yapılan incelemeler ile tasarlanacak kontrol kartı sisteminde: endüstriyel ortamlarda

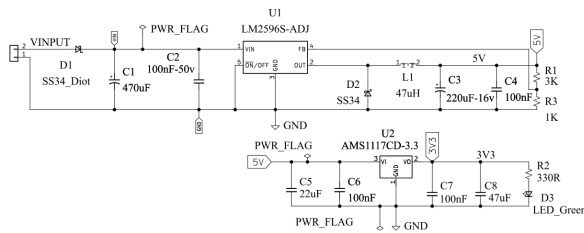
yaygın olarak kullanılan denetleyici alan ağı (CAN) [3], evrensel asenkron alıcı/verici (UART) haberleşme protokollerinin desteklemesi gerekliliğinin önemli olduğu ve RS485 dönüştürücü [4] ile, I2C modülünün de önemli olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte kartın, farklı iletişim altyapılarına sahip sistemlerle entegrasyonu kolaylaştırılarak kullanım alanı genişletilmiştir. RS485 protokolüne, özellikle endüstriyel otomasyon sistemlerinde uzun mesafe haberleşme, çok noktalı ve elektromanyetik girişime karşı dayanıklı veri iletimi sağlaması gibi özelliklerinden dolayı öncelik verilmiştir.

Bununla birlikte MODBUS (Modicon tarafından geliştirilen seri haberleşme protokolü), RS485 hattı üzerinde çalışan ve endüstriyel cihazlar arasında standartlaştırılmış veri değişimini mümkün kılan ve farklı üreticilere ait sistemlerin birbiriyle uyumlu çalışmasına olanak tanıyan bir protokol olduğu için tercih edilmiştir. Ayrıca, tasarlanan kontrol kartı üzerinde RS485 fiziksel katmanı ile uyumlu MODBUS haberleşmesi için gerekli yazılım entegre edilmiştir. Böylece, saha cihazlarının merkezi kontrol sistemlerine güvenli ve kararlı bir şekilde bağlanması sağlanmıştır. Sistemin ana işlemcisi, ARM Cortex-M3 çekirdeğine sahip, 32 bit mimarili STM32F103C8 serisi, detayları [5]'de verilmiş olan mikrodenetleyici tercih edilmiştir. Bu mikrodenetleyici, sunduğu yüksek işlem gücü, düşük güç tüketimi ve zengin çevresel birim desteği sayesinde endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan esnekliğinden dolayı önemlidir.

Ayrıca, CAN ve UART gibi haberleşme birimlerinin donanımsal olarak desteklenmesi, sistem tasarımının hem performansını hem de güvenilirliğini artırmaktadır. Ek olarak, aktif yük sürme kapasitesini artırmak amacıyla, çıkış

birimi olarak kart üzerine iki adet röle entegre edilmiştir. Dolayısıyla, rölelerin kullanımı ile, endüstriyel sahadaki motorlar, valfler veya diğer güç gereksinimi olan yüklerin doğrudan kontrol edilebilmesi mümkün kılınmış, sistemin sahada bağımsız çalışabilirliği ve kontrol kabiliyeti güçlendirilmiştir. Elektromanyetik parazitlere karşı güç yönetimi, elektromanyetik girişimlere (EMI) karşı yüksek bağışıklık ve endüstriyel elektromanyetik uyumluluk (EMC) önemli olduğu için, Şekil 1’de görüldüğü gibi maksimum 24 V giriş gerilimini ve 3 A çıkış akımını destekleyen detayları [6]’da verilen LM serisi LM2596S-ADJ gerilim regülatörü entegresi kullanımı uygun görülmüştür. Seçilen bu regülatör, aşırı gerilim korumasının yanı sıra sistem güvenliğini artırmış ve endüstriyel ortamların zorlu koşullarında stabil çalışmayı mümkün kılmıştır. Ayrıca bu entegrenin çıkış gerilimi, entegre üzerindeki geri besleme dirençleri aracılığıyla istenilen seviyede stabilize edilebilmektedir. Dolayısıyla, LM2596S-ADJ entegrenin çıkışında 5V’luk bir gerilim sağlanmıştır. Buna ek olarak, STM32 mikrodnetleyicisinin çalışma gerilimi olan 3.3V’a indirgenmesi amacıyla, detayları [7]’de verilen AMS1117 düşük voltaj regülatörü kullanılmıştır. Bu sayede, mikrodnetleyicinin ihtiyaç duyduğu 3.3V sabit DC gerilim sağlanarak, mikrodnetleyicinin güvenli bir şekilde çalışması temin edilmiştir.

Haberleşme altyapısının yazılım geliştirme sürecinde, tüm protokoller için bağımsız sürücüler geliştirilmiş ve protokoller arası geçişlerde sistemin kararlılığı sağlanmıştır. Kullanıcı deneyimini artırmak amacıyla, 12C tabanlı bir ekran modülü entegre edilmiştir. Ekran modülü ile: sistem durumu, haberleşme hataları veya operasyonel bilgilerin kullanıcıya görsel olarak aktarılması sağlanmıştır. Tasarlanan kart üzerinde ayrıca, 12 bit ADC okuması için bir potansiyometre ve PWM sinyali üretebilecek bir çıkış birimi de bulunmaktadır. Tüm elektronik elemanlar, standartlara uygun yerleşim kurallarına göre baskı devre kartı (PCB) üzerinde konumlandırılmıştır. Ayrıca, kart üzerindeki iletken izler, diferansiyel sinyal bütünlüğünü koruyacak şekilde yönlendirilmiştir. Sonuç olarak bakım ve hata giderme süreçleri hızlandırılarak endüstriyel sahada verimliliğin artırılmasına katkıda bulunulması amaçlanmıştır.



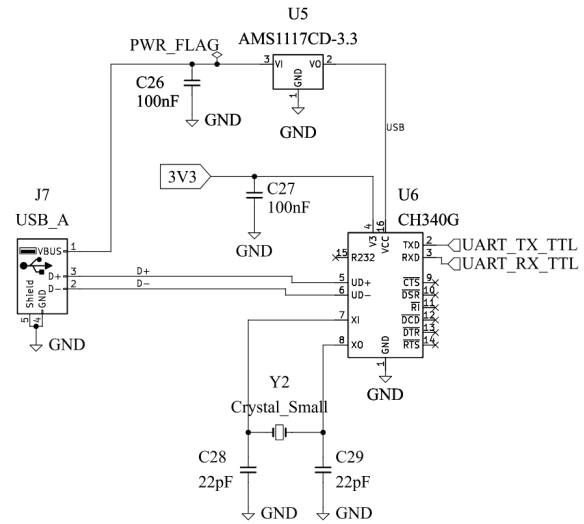
Şekil 1: 3.3 V sabit gerilim elde etme bloğu şematik gösterim

III. UART BİRİMİ

Şekil 2’de şematik olarak gösterilen UART protokolü, düşük güç tüketimi ve basit bağlantı gereksinimleri sayesinde taşınabilir cihazlarda veya düşük maliyetli uygulamalarda etkili bir çözüm sunmaktadır. Endüstriyel otomasyon sistemlerinde, sensörler, motor sürücüler ve kontrol cihazları gibi çeşitli bileşenler arasında iletişimi sağlamak amacıyla bu protokol sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, bu protokol ile sistemler arasında düşük gecikme süresi ve güvenli bir şekilde veri transferi gerçekleştirilebilmekte sistemin kararlılığı ve performansı güçlendirilmektedir. STM32

mikrodnetleyicisi üzerine UART haberleşme biriminin entegrasyonu, sistemin genel verimliliğini ve esnekliğini artırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, UART protokolü ile evrensel seri veri yolu (USB) arasında veri iletimi sağlamak için detayları [8]’de verilen CH340G USB-Serial dönüştürücü entegresi tercih edilmiştir. Ayrıca, bu kullanım sistemin diğer haberleşme protokolleriyle (örneğin, CAN veya RS485) birlikte çalışabilmesini sağlayarak, haberleşme altyapısının esnekliğini artırmaktadır. CH340G, mikrodnetleyici ile bilgisayar veya başka bir USB uyumlu cihaz arasında güvenli ve verimli bir haberleşme köprüsü kurmakta ve USB tarafında veri iletimi için veri hattını kullanmaktadır. Bu veri hattı, diferansiyel sinyal iletimi sağlayarak, uzun mesafelerde ve gürültülü ortamlar içinde veri iletiminde güvenliği ve doğruluğu artırır. Diferansiyel sinyal iletimi, iki hat üzerinden verilerin birbirine zıt şekilde iletilmesi ile oluşur ve elektromanyetik girişimlere karşı yüksek bağışıklık sunar. Bu sayede, veri iletiminde yüksek güvenilirlik ve düşük hatalar sağlanmış, ayrıca çevresel gürültüye karşı dayanıklılık artırılmıştır.

PCB tasarımında, USB veri iletim hattı diferansiyel hat olarak belirlenmiş ve bu hat uygun yerleşim kuralları ile tasarlanmıştır. Bunun sonucu olarak, endüstriyel otomasyon uygulamalarında stabil ve yüksek performanslı iletişim sağlanmıştır.



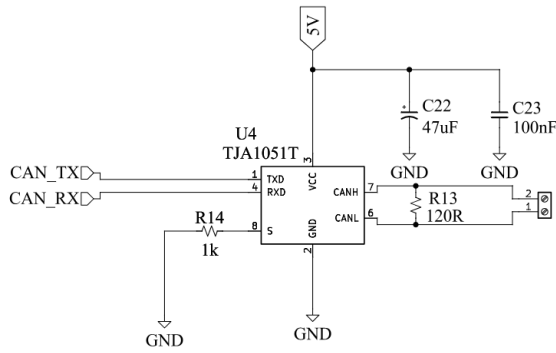
Şekil 2: UART haberleşme birimi şematik gösterim

IV. CANBUS HABERLEŞME BİRİMİ

Endüstriyel iletişimde, verimli, gerçek zamanlı ve güvenli veri aktarımı için Şekil 3’te şematik olarak verilmiş CANBUS haberleşme protokolü yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu protokol özellikle elektromanyetik girişimin yoğun olduğu sahalarda sunduğu: hata tespiti, otomatik hata düzeltme mekanizmaları ve çoklu cihaz desteği sayesinde, endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma kapsamında CANBUS fiziksel katman haberleşmesi için detayları [9]’da verilmiş olan TJA1051T model CAN alıcı/verici kullanılmıştır. TJA1051T, düşük güç tüketimi, yüksek elektromanyetik uyumluluk (EMC) performansı ve yüksek hızlı veri iletimi gibi özellikleri ile endüstriyel uygulamalar için uygun bir çözüm sunmaktadır. Bu entegre ile, STM32 mikrodnetleyicisinin donanımsal CAN modülü ile doğrudan güvenli ve kararlı bir haberleşme altyapısı oluşturulmuştur.

CANBUS hattı üzerinde, veri bütünlüğünü sağlamak ve hat üzerindeki sinyal yansımalarını önlemek amacıyla, standartlara uygun şekilde her iki uçta 120 Ω 'luk sonlandırma dirençleri kullanılmıştır. Sonlandırma direnci, özellikle uzun mesafe ve yüksek baud hızlarında çalışan sistemlerde, sinyal kalitesinin korunmasında ve iletişim güvenilirliğinin artırılmasında kritik bir bileşen olarak görev yapmaktadır. Geliştirilen kontrol kartında, CANBUS haberleşmesi, RS485 ve UART gibi diğer seri iletişim protokolleriyle birlikte çalışabilecek esnek bir mimariye tasarlanmıştır. Böylelikle sistem, farklı haberleşme protokollerini kullanan saha cihazları ile kolaylıkla entegre olabilmekte ve çok protokollü veri alışverişine olanak tanımaktadır.

Ayrıca, ağ üzerindeki tüm cihazların merkezi bir yönlendiriciye ihtiyaç duymadan doğrudan iletişim kurabilmesi, sistem esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 3: CANBUS birimi şematik gösterim

V. RS485 BİRİMİ

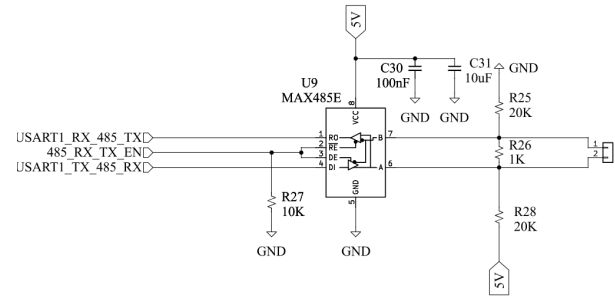
Şekil 4'te şematik olarak verilmiş RS485, diferansiyel sinyal iletim yöntemi kullanarak EMI'ye karşı yüksek düzeyde korunum sağlamakta zorlu çevresel koşullara sahip endüstriyel ortamlarda güvenilir bir iletişim altyapısı oluşturulmasına olanak sunmaktadır. Bu nedenle, uzun mesafelerde ve çok noktaya veri iletiminin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla RS485 protokolü yaygın olarak tercih edilmektedir.

Ayrıca, aynı veri hattı üzerinden birden fazla cihazın haberleşmesine imkân tanıyan yarı çift yönlü yapısı ile sistem tasarımında esneklik sağlamaktadır. Bu çalışmada, RS485 fiziksel katmanı için MAX485 entegresi seçilmiş ve kart üzerindeki uygunluğu, detaylarıyla birlikte referans [10]'da sunulan bilgiler doğrultusunda değerlendirilmiştir. MAX485, düşük güç tüketimi, küçük boyutlu tasarımı ve yüksek performanslı haberleşme yetenekleri ile endüstriyel uygulamalara uygun bir RS485/RS422 alıcı/verici entegresidir. Bu entegre aracılığıyla, mikrodeneleyici katmanında yer alan transistör-transistör mantık (TTL) seviyesi sinyaller, RS485 standardına uygun diferansiyel sinyallere dönüştürülmüş ve sistemin endüstriyel haberleşme altyapılarıyla uyumluluğu sağlanmıştır.

Üst katmanda ise, cihazlar arası standart veri alışverişine imkân tanıyan ve endüstriyel otomasyon alanında yaygın şekilde kullanılan MODBUS uzaktan kontrol ünitesi (RTU) protokolü uygulanmıştır. Bu protokol, sahadaki sensörler,

eyleyiciler (aktüatörler) ve kontrol cihazları arasında güvenilir, hızlı ve standardize edilmiş bir iletişim sağlamaktadır. Dolayısıyla, farklı üreticilere ait cihazların sistem içerisine entegrasyonu kolaylaştırılmış, aynı zamanda sistemin ölçeklenebilirlik ve sürdürülebilirlik düzeyi artırılmıştır.

Sonuç olarak, MAX485 entegresi kullanılarak oluşturulan RS485 haberleşme altyapısı, uzun mesafe ve çok noktalı endüstriyel veri iletişim ihtiyaçlarına etkili bir çözüm sunmuş, MODBUS RTU protokolü desteği ile sistemin genel iletişim esnekliği ve güvenilirliği güçlendirilmiştir.

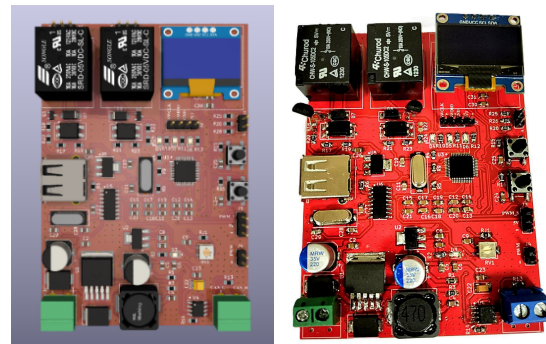


Şekil 4: RS485 birimi şematik gösterim

VI. PCB TASARIMI VE ÜRETİM SONRASI TESTLER

Şekil 5(a)'da üç boyutlu PCB görünümü verilmiş geliştirilen kontrol kartının, EMC ve EMI standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Devre kartı üzerinde, yüksek hızlı iletişim hatlarının bütünlüğünü sağlamak amacıyla diferansiyel veri yolları dikkatlice yönlendirilmiş ve minimum parazit alımı için iz genişlikleri ile katman geçişleri optimize edilmiştir. Özellikle CANBUS ve RS485 gibi diferansiyel haberleşme hatlarında, veri bütünlüğünü korumak amacıyla izler eş uzunlukta tasarlanmıştır.

Komponent yerleşimi sırasında, güç yönetimi birimleri, haberleşme sürücüler ve mikrodeneleyici modülü, termal dağılım ve sinyal bütünlüğü göz önünde bulundurularak belirli bloklar halinde gruplanmıştır. Yüksek akım taşıyan yollar (örneğin röle çıkışları) geniş iz genişlikleri ile desteklenmiş, düşük güçlü haberleşme sinyalleri ise ayrı izole bölgelerde yönlendirilmiştir. Ayrıca, kritik bileşenlerin çevresinde topraklama katmanı kullanılarak, sistemin EMI'ye karşı bağışıklığı artırılmıştır. PCB tasarımı üç boyutlu (3B) ortamda simüle edilmiş ve üretim öncesinde bileşen yerleşimi ile mekanik uyumluluk doğrulanmıştır.



a) PCB tasarım 3B görünümü b) Üretilen PCB
Şekil 5: Baskılı devre kartı

Ayrıca Şekil 5(b)'de verilmiş olan üretilen PCB üzerinde bileşenlerin yerleşim stratejisi görsel olarak detaylandırılmaktadır. Tasarımı tamamlanan PCB'nin üç boyutlu (3B) görünümü, üretim öncesinde bileşen yerleşimi ve mekanik uygunluk açısından incelenmiş ve doğrulanmıştır. Yapılan ön izleme, montaj sürecinde oluşabilecek olası hataların önüne geçilmesini sağlamış ve üretim kalitesini artırmıştır. Üretim sonrası yapılan kontrollerde, bileşenlerin yerleşimi, lehim kalitesi ve sinyal yollarının doğru şekilde oluşturulduğu doğrulanmıştır. PCB üzerinde geniş yüzeyli toprak (GND) dolguları, iz genişlikleri ve diferansiyel hatlar gibi kritik tasarım unsurlarının üretim sürecinde başarıyla korunduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle hem mekanik sağlamlık hem de elektriksel performans açısından endüstriyel uygulamalara uygun bir tasarım elde edilmiştir. Şekil 6'da test sürecine ait genel görünüm yer almakta, Şekil 7'de 50 Hz. frekansında oluşturulan PWM sinyali, Şekil 8'de CANBUS hattı üzerinden iletilen gerçek zamanlı veri ve Şekil 9'da I2C protokolü ile çalışan SSD1306 OLED ekranın haberleşme görüntüsü sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kontrol kartının endüstriyel uygulamalarda çok protokollü haberleşme ihtiyacını karşılayabilecek düzeyde kararlı ve güvenilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.



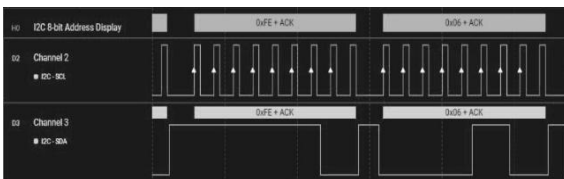
Şekil 6: Kartın Test Süreci



Şekil 7: 50Hz PWM sinyalinin oluşturulması



Şekil 8: CanBUS Veri Hattının Sinyali



Şekil 9: I2C SSD1306 Ekranın Haberleşme Sinyali

VII. SONUÇ

Bu çalışmada, endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılmak üzere, çoklu haberleşme protokol desteği sunan ve yüksek güvenilirlik sağlayan bir kontrol kartı tasarlanmıştır. Geliştirilen kart; RS485, CANBUS ve UART gibi yaygın protokolleri destekleyerek, farklı iletişim altyapılarına sahip sistemlerle entegrasyonu mümkün kılan esnek bir mimari sunmaktadır. Tasarım sürecinde, güç yönetimi, elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve sinyal bütünlüğü gibi kritik parametreler göz önünde bulundurularak çeşitli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerindeki işlevsel testler sonucunda, tüm haberleşme birimlerinin hedeflenen protokol standartlarına uygun şekilde çalıştığı doğrulanmıştır.

VIII. KAYNAKLAR

- [1] Yunzhou, Z., & Chengdong, W. (2011, May). Design of a training and experimental platform based on multi-protocol communication. In *2011 International Conference on E-Business and E-Government (ICEE)* (pp. 1-4). IEEE.
- [2] Raza, A., Ikram, A. A., Amin, A., & Ikram, A. J. (2016, December). A review of low cost and power efficient development boards for IoT applications. In *2016 Future Technologies Conference (FTC)* (pp. 786-790). IEEE.
- [3] Kim, D., & Tran-Dang, H. (2018). Industrial sensors and controls in communication networks: From Wired Technologies to Cloud Computing and the Internet of Things. Springer.
- [4] Dawoud Shenouda Dawoud, & Dawoud, P. (2022). *Serial Communication Protocols and Standards*. CRC Press.
- [5] STMicroelectronics. (2023, September). *STM32F103x8, STM32F103xB medium-density performance line Arm®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 communication interfaces datasheet* (Rev. 19) [Data sheet].
- [6] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf>
- [7] Texas Instruments. (2023, March). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® power converter 150-kHz 3-A step-down voltage regulator datasheet* (Rev. G)[Data sheet].
- [8] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [9] Advanced Monolithic Systems. (n.d.). *AMS1117 adjustable and fixed low dropout voltage regulator datasheet* [Data sheet]. <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [10] Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd. (n.d.). *CH340G USB to serial chip datasheet* [Data sheet]. <https://static.efetividade.net/img/ch340g-datasheet-34852.pdf>
- [11] NXP Semiconductors. (2017, November 28). *TJA1051 high-speed CAN transceiver datasheet* (Rev.9)[Data sheet].
- [12] <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1051.pdf>
- [13] Analog Devices.(2017, October 18). *MAX481/MAX483/MAX485/MAX487-MAX491/MAX1487: Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 transceivers* (Rev. 11). <https://www.analog.com/MAX481/datasheet>

Çelik Yüzeylerinde Oluşan Üretimsel Arızalarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tespiti

Yusuf Akgül, Luay Arub, Abdülsamet Güngör, Ahmet Yunus, Samet Bolat, Beyda Taşar

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Elazığ, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, paslanmaz çelik levhalarda üretim sürecinde oluşabilecek yüzey kusurlarının otomatik olarak sınıflandırılmasını amaçlamaktadır. Geleneksel manuel denetim yöntemlerinin zaman alıcı ve hataya açık yapısından farklı olarak, makine öğrenmesi algoritmaları ile hata tespiti daha hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu kapsamda, Semeion Araştırma Bilimleri Merkezi tarafından oluşturulan ve yedi farklı yüzey kusurunu içeren veri seti kullanılmıştır. Veri setinde yer alan 27 sayısal öznitelik, çelik levhalar üzerindeki kusurların geometrik ve görsel özelliklerini temsil etmektedir. Çalışmada, sınıflandırma işlemi için üç farklı makine öğrenmesi algoritması olan Karar Ağacı (DT), En Yakın Komşu (KNN) ve Rastgele Orman (RF) yöntemleri kullanılmıştır. Modellerin başarımı doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, Rastgele Orman algoritmasının %81.75 doğruluk oranı ile en iyi performansı sergilediğini, KNN algoritmasının yüksek duyarlılık değeriyle pozitif sınıfları başarıyla ayırt ettiğini ve Karar Ağacı yönteminin ise sadeliğiyle uygulanabilirlik açısından avantaj sunduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgular, makine öğrenmesine dayalı yaklaşımların çelik üretiminde kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirme ve hataları daha hızlı tespit etme potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekte daha geniş ve dengeli veri kümeleri ile desteklenen çalışmalar, model başarımını artırarak sanayi uygulamaları için daha güvenilir çözümler sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Çelik Yüzey Kusurları, Kalite Kontrol, Arıza Tespiti, Makine Öğrenmesi.

I. GİRİŞ

Çelik, yapı ve sanayi alanlarında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Ancak düz çelik levhaların üretimi ve işlenmesi oldukça karmaşıktır. Üretim sürecinde döküm, çekme, kesme ve katlama gibi işlemler sırasında makinelerin çelik yüzeye temas etmesi deformasyonlara yol açabilir. Bu yüzey kusurları sadece ürün kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda kullanım sürecinde korozyon ve aşınma direncini de olumsuz etkiler.

Çelik levhalarda üretim sırasında oluşabilecek hatalar (örneğin hamurumsu yapı, Z-çizik, K-çizik, leke, kirlenme) uzun yıllar boyunca uzmanlar tarafından manuel olarak incelenmiştir. Ancak bu yöntem hem zaman alıcıdır hem de maliyetlidir. Ayrıca insan hatasına bağlı olarak bazı kusurlar gözden kaçabilir. Bu durum üretim sürecinde verimsizlik yaratmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte üretim süreçleri dijitalleşmiş ve hata tespiti için görüntü işleme temelli bilgisayar destekli sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemler sayesinde üretim hattındaki ürünler hızlı bir şekilde analiz edilebilmekte ve küçük kusurlar bile tespit edilebilmektedir. Hata teşhis algoritmaları genellikle veri madenciliği tekniklerine dayanır ve geçmişteki hata verilerinden öğrenerek kusurları sınıflandırabilir.

Çelik yüzeylerinde görülen hata türlerinin çok çeşitli olması, yüksek performanslı sınıflandırma algoritmalarının geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, özellikle küçük veri kümelerinde dahi etkili çalışabilecek algoritmalar geliştirmek için çalışmalarına devam etmektedir.

Nkonyana [1], RF ve SVM metodlarını kullanarak, RF ile %77,8 (en yüksek doğruluğu) ve SVM ile %73,6 başarı elde etti. Halawani [2], DT metodlarından biri olan AdaBoost.M1 kullanarak %81.92'lik bir başarı elde etti. Chen [3], DT ve

Makine Görmesini kullanarak %85,43 doğruluk oranı elde etmiştir. Tabar&Rashid [4], Fitness Dependent Optimizer and Neural Networks kullanarak %100 başarı oranı yakalamıştır. Srivastava [5], RF metodunu kullanarak %79.23 başarı oranı elde ederken aynı zamanda DT metodu olan AdaBoost'u kullanarak %79.08'lik doğruluk elde etti. Ghasemkhani, Yilmaz, Birant,Kut [6], LMT forest ile kıyaslama için RF metodunu kullanıp,LMT forest ile ortalama %86.655 başarı elde edip RF'dan(%79.547) daha yüksek bir başarı yakalamıştır. Abdullahi, Samsudin, İbrahim, Aripin, Khalid, Othman [7], LR NB SVM metodlarını kullanarak sırasıyla %94.5 ,%94 ,%94.2 başarı oranlarını yakalamıştır. Kharal [8], RF ile beraber XAI ve veri seti metodları kullanarak (SMOTE, Oversample vb.) en yüksek %94.18 başarı elde etmiştir. Zhao, Yang, Lu, Wang [9], BPNN ve LOF metodlarını birleştirerek %94.68 başarı yakalamıştır. Feyzioglu & Taspınar [10], LR,DT,SVM, RF yöntemlerini kullanmış olup en yüksek doğruluk oranını RF'da %79.44 yakalamıştır. Ozkat [11], Adaboost metodunu kullanarak eğitim ve testte sırasıyla %93.15, %91.90 başarı oranlarını elde etmiştir.

Bu çalışma, çelik levha yüzeylerinde görülen altı farklı kusurun tespiti için öznitelik seçimi ve makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanmasını amaçlamaktadır. Sınıflandırma amacıyla En Yakın Komşu (KNN), Karar Ağacı (DT), Rastgele Orman (RF) algoritmaları kullanılmıştır. Tüm yöntemlerin başarımı; doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1 skoru metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

II. YÖNTEM

Bu bölümde, paslanmaz çelik levhalarda oluşan yüzey kusurlarının sınıflandırılmasına yönelik olarak kullanılan veri seti, öznitelikler, uygulanan makine öğrenmesi

algoritmaları ve değerlendirme metrikleri detaylı şekilde açıklanmıştır.

II.1. Veri seti ve Özellikleri

Bu çalışmada, paslanmaz çelik levhalardaki yedi farklı yüzey kusurunun sınıflandırılması amacıyla, Semeion Araştırma Bilimleri Merkezi tarafından oluşturulan ve Kaggle ile UCI veri platformlarında paylaşılan "Hatalı Çelik Levhalar" veri seti kullanılmıştır. Veri seti, yüzey kusurlarının geometrik özelliklerini temsil eden 27 sayısal öznitelikten oluşmaktadır. Sınıf ve özellik bilgileri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1: Hata türleri ve veri setindeki örnek sayıları

Hata /Arıza tipi	Değer
Hamur Hatası	158
Z Çizik	190
K Çizik	391
Lekeler	72
Kirlenme	55
Tümsekler / Kabartılar	402

Tablo 2: Veri setindeki özellik kümesi

X Ekseninde Minimum Değer	Kenar İndeksi
X Ekseninde Maksimum Değer	Boşluk İndeksi
Y Ekseninde Minimum Değer	Karelik İndeksi
Y Ekseninde Maksimum Değer	X Dış İndeksi
Piksel Alanları	Kenar X İndeksi
X Ekseninde Çevre	Kenar Y İndeksi
Y Ekseninde Çevre	Genel Dış İndeks
Parlaklık Toplamı	Alanların Logaritması
Minimum Parlaklık Değeri	X Logaritmik İndeksi
Maksimum Parlaklık Değeri	Y Logaritmik İndeksi
Konveyör Uzunluğu	Yönelim İndeksi
Çelik Türü A300	Parlaklık İndeksi
Çelik Türü A400	Alanların Sigmoid Dönüşümü
Çelik Levha Kalınlığı	

II.2. Sınıflandırma Yöntemleri

Karar Ağacı (DT), verilerin belirli bir parametreye göre sürekli olarak bölündüğü, denetimli bir makine öğrenmesi türüdür. Ağaç yapısı, karar düğümleri ve yaprak düğümler olmak üzere iki temel unsurla açıklanabilir. Karar ağaçları, sınıflandırma modellerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bunun nedeni, yapılandırılmasının ve anlaşılmasının kolay olması, model şeffaflığı sunması ve görsel olarak ifade edilebilirliğidir [12].

En yakın komşu (K-Nearest Neighbor-KNN) yöntemi, parametrik olmayan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Temel matematiksel prensiplere dayandığı için oldukça sade bir modeldir ve birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel ilke, bilinmeyen bir değişkenin sınıfının, en yakın komşularının sınıfı ile aynı olacağı varsayımına dayanır. Tahmin sonucunu hesaplamak için eğitim verisindeki k en yakın ögenin mevcut durumlarının ortalaması alınır. Bu yöntemde “k” harfi, dikkate alınan komşu sayısını ifade eder. Optimum sınıflandırma veya tahmin doğruluğunu belirlemek için “k” değeri oldukça önemlidir. Uygun k değeri deneme-yanılma veya çapraz doğrulama

yöntemleriyle belirlenebilir. Verinin sınıfı, eğitim setine olan en yakın k komşunun ortalaması ile hesaplanır ve elde edilen değer belirli bir eşik değeriyle karşılaştırılarak yorumlanır [13].

Rastgele Orman (RF) modeli, birden fazla karar ağacından oluşan bir karar topluluğu (orman) oluşturmaya dayalı bir yöntemdir. RF modeli, yüzlerce karar ağacının bir araya getirilmesiyle oluşur ve kapsamlı bir karar elde etmek için, tüm ağaçlardan çıkan kararlar çoğunluk oylaması yöntemiyle değerlendirilerek nihai karar üretilir [14]. Bu çalışmada kullanılan yöntemler için parametre seçimi Tablo 3’deki gibi yapılmıştır.

Tablo 3: Yöntemlere ilişkin tasarım parametreleri

Yöntem	Parametre
En yakın Komşu	k=3, Ağırlıklandırma yöntemi: 'uniform', Mesafe ölçütü: 'euclidean'
Karar Ağacı	Bölme kriteri: 'gini' , Maksimum ağaç derinliği:10
Rastgele Orman	Ağaç sayısı:100, Maksimum derinlik:20

II.3. Performans Metrikleri

Makine öğrenmesi algoritmalarının performansını karşılaştırmak amacıyla; hassasiyet (precision), duyarlılık (sensitivity), doğruluk (accuracy) ve F1 skoru gibi çeşitli standart değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Başarıyla tahmin edilen durumların sayısı gerçek pozitif (TP), yanlış tahmin edilen durumların sayısı ise yanlış negatif (FN) olarak adlandırılır. Gerçek negatif (TN), başarıyla tahmin edilen olumsuz durumların sayısını; yanlış pozitif (FP) ise yanlış şekilde olumlu olarak tahmin edilen olumsuz durumların sayısını ifade eder. Ayrıca yöntemlerin veriler üzerindeki tahmin başarımını göstermek için karışıklık matrisi (confusion matrix) kullanılmıştır. Karışıklık matrisi, sınıflandırma modelinin test verileri üzerindeki tahmin sonuçlarını, bilinen hedef sınıf etiketleriyle karşılaştırarak sayısal olarak sunan bir tablodur. Bu çalışmada kullanılan performans değerlendirme metrikleri Tablo 4’te verilmiştir

Tablo 4: Performans Metrikleri

Metrik	Denklem
Pozitif Tahmini Değer	$\frac{TP}{TP+FP}$
Gerçek Pozitif Oran	$\frac{TP}{TP+FN}$
Çoklu Sınıf Doğruluk	$\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$
F1-Puanı	$2x \frac{PPV*TPR}{PPV+TPR}$

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

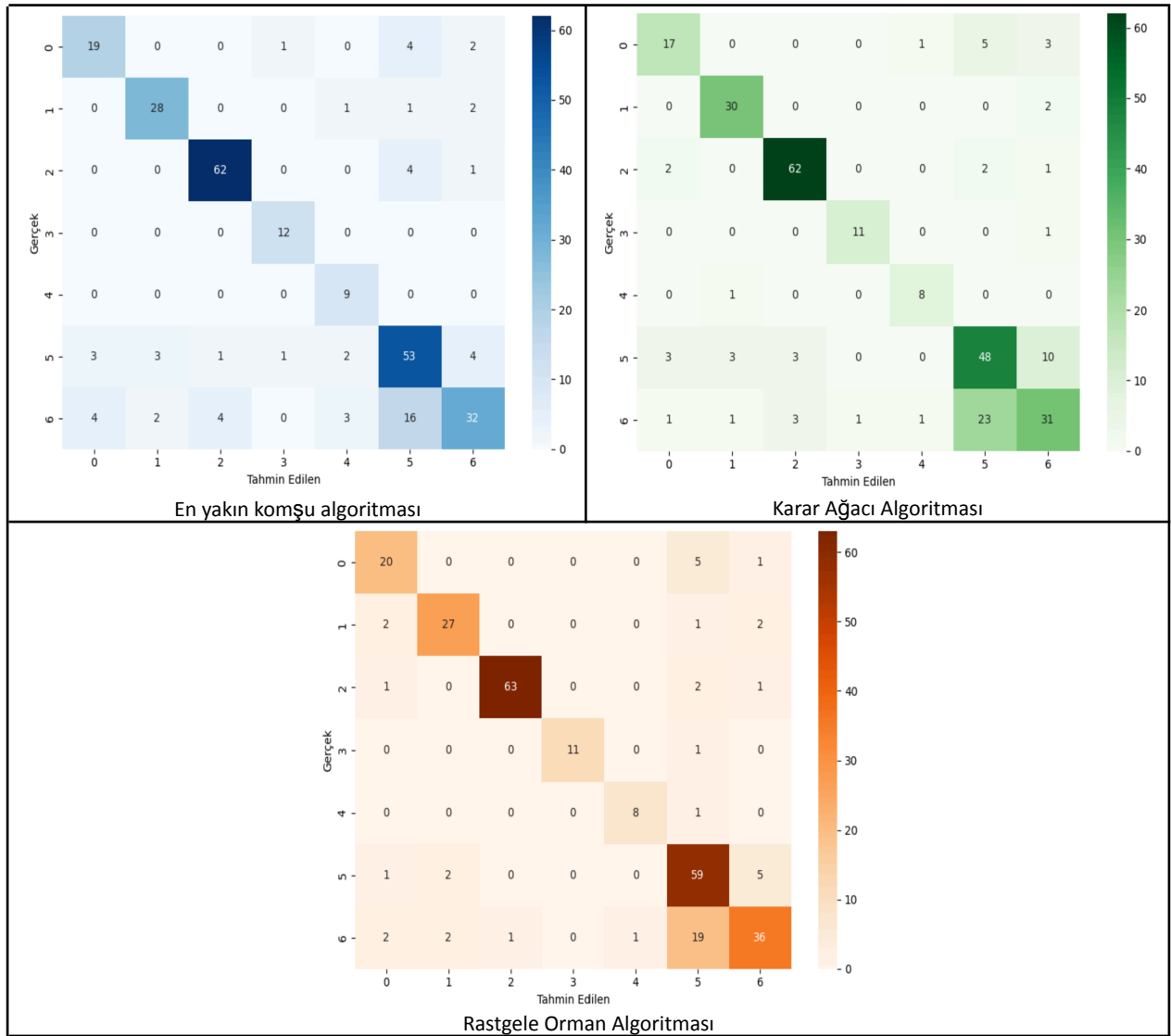
Bu çalışmada, çelik yüzeyindeki üretimsel kusurların sınıflandırılması amacıyla Karar Ağacı (DT), En Yakın Komşu (KNN) ve Rastgele Orman (RF) algoritmaları kullanılmış ve her modelin performansı doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metrikler açısından değerlendirilmiştir. Önerilen yöntemin uygulanması için Intel i9 10. nesil işlemciye ve 64 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Uygulama, Python programlama dili kullanılarak Kaggle platformu üzerinde bu bilgisayar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Veri seti %80 eğitim %20 test veri seti olacak şekilde rastgele olarak seçilerek ayrılmıştır. Tablo 5’de sunulan sonuçlara göre, tüm modeller kabul edilebilir düzeyde sınıflandırma başarısı gösterse de,

aralarındaki performans farkları dikkat çekicidir. Rastgele Orman (RF) algoritması, dört metrik açısından da en yüksek başarıyı göstermiştir. %81.75 doğruluk oranı ile diğer iki modele göre daha güvenilir tahminler sunmuş, özellikle hassasiyet (%85.48) ve F1 skoru (%83.92) ile öne çıkmıştır. Bu durum, RF algoritmasının çok sayıda karar ağacının bir araya getirilmesiyle elde edilen yapısından kaynaklanmakta olup, veri setindeki karmaşık desenleri yakalama konusunda üstünlük sağlamıştır. En Yakın Komşu (KNN) algoritması, %78.47 doğruluk oranıyla RF modelinin ardından ikinci sırada yer almıştır. Duyarlılık açısından %83.53 ile en yüksek değeri sunması, modelin pozitif sınıfları ayırt etme konusunda başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak hassasiyetin biraz daha düşük olması (%77.45), modelin

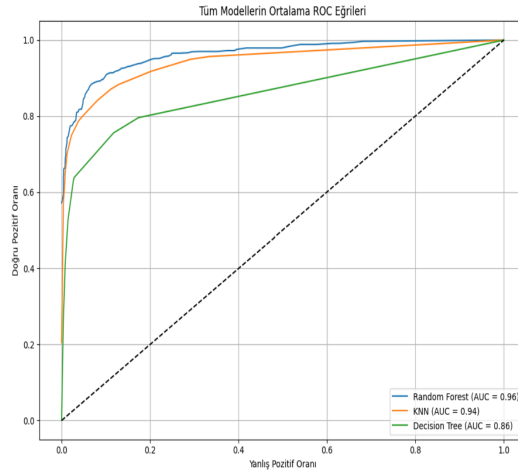
zaman zaman yanlış pozitif tahminlerde bulunabildiğine işaret etmektedir. Yine de F1 skoru açısından (%79.27) tatmin edici bir denge sağlamıştır. Karar Ağacı (DT) algoritması ise %75.55 doğruluk ile en düşük performansı göstermiştir. Duyarlılık (%79.24) ve hassasiyet (%78.37) değerleri dengeli olsa da, tekil ağaç yapısının aşırı öğrenme (overfitting) riskine açık olması, modelin genel başarımını sınırlandırmıştır. Buna rağmen %78.54 F1 skoru ile sınıflar arasında makul bir denge kurduğu söylenebilir. Karışıklık matrisleri (Şekil 1) ve ROC eğrileri (Şekil 2) incelendiğinde, özellikle RF modelinin sınıflar arasında daha az karışıklık oluşturduğu ve yüksek duyarlılık ile özgüllük arasında iyi bir denge kurduğu görülmüştür.

Tablo 5: Modellerin performans metriklerine göre karşılaştırması

Model	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 Skor
Karar Ağacı Algoritması	0.7555	0.7837	0.7924	0.7854
En Yakın Komşu Algoritması	0.7847	0.7745	0.8353	0.7927
Rastgele Orman Algoritması	0.8175	0.8548	0.8328	0.8392



Şekil 1: Modellerle ilişkin karışıklık matrisleri



Şekil 2: Modellerin ROC eğrisi grafikleri

Genel olarak, Rastgele Orman algoritması, sınıflandırma performansı açısından bu çalışma kapsamında en etkili yöntem olarak belirlenmiştir. Diğer iki model ise daha basit yapılarıyla yorumlanabilirlik avantajı sunmakta ve küçük veri setlerinde etkili alternatifler olarak değerlendirilebilir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, paslanmaz çelik levhalarda üretim sırasında oluşabilecek yüzey kusurlarının sınıflandırılmasına yönelik olarak çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları uygulanmış ve karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Semeion Araştırma Bilimleri Merkezi tarafından oluşturulan ve yedi farklı kusur türünü içeren veri seti kullanılarak; Karar Ağacı (DT), En Yakın Komşu (KNN) ve Rastgele Orman (RF) algoritmalarının başarımları doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metrikler üzerinden değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Rastgele Orman algoritması tüm performans kriterlerinde en yüksek başarıyı göstererek, çelik yüzey kusurlarının otomatik olarak tespiti için en uygun model olarak öne çıkmıştır. KNN algoritması, yüksek duyarlılık değeriyle pozitif sınıfları başarıyla ayırt edebilmiş, Karar Ağacı modeli ise anlaşılır yapısı ve hızlı uygulanabilirliği ile öne çıkmıştır, ancak doğruluk oranı bakımından diğer modellerin gerisinde kalmıştır. Çalışma sonucunda, klasik yöntemlerin aksine makine öğrenmesine dayalı bu yaklaşımların endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde otomatik, hızlı ve güvenilir bir hata tespiti sağlama potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Gelecekte, daha büyük ve dengeli veri setleri ile çalışarak model başarımları daha da artırılabilir ve derin öğrenme teknikleri ile karşılaştırmalı yeni çalışmalar yapılabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Nkonyana, T., Sun, Y., Twala, B., & Dogo, E. (2019). Performance evaluation of data mining techniques in steel manufacturing industry. In 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing (SMPM 2019) (pp. 623–628).
- [2] Halawani, S. M. (2014). A study of decision tree ensembles and feature selection for steel plates faults detection. *International Journal of Technical Research and Applications*, 127–131.
- [3] Chen, J. (2018). The application of tree-based ML algorithm in steel plates faults identification. *Journal of Applied and Physical Sciences*, 4(2), 47–54.
- [4] Farahmand-Tabar, S., & Rashid, T. A. (2024). Steel plate fault detection using the fitness dependent optimizer and neural networks. In *Handbook of Formal Optimization* (pp. 1–19). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [5] Srivastava, A. K. (2019). Comparison analysis of machine learning algorithms for steel plate fault detection. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(5), 1231–1234.
- [6] Ghasemkhani, B., Yılmaz, R., Birant, D., & Kut, R. A. (2023). Logistic model tree forest for steel plates faults prediction. *Machines*. <https://www.mdpi.com/journal/machines>
- [7] Abdullahi, A. (2020). Towards IR4.0 implementation in e-manufacturing: Artificial intelligence application in steel plate fault detection. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 20(1), 430–436.
- [8] Kharal, A. (2020). Explainable artificial intelligence based fault diagnosis and insight harvesting for steel plates manufacturing. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.04448>
- [9] Zhao, Z., Yang, J., Lu, W., & Wang, X. (2015). Application of Local Outlier Factor method and Back-Propagation Neural Network for steel plates fault diagnosis. In 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (pp. 2416–2421).
- [10] Feyzioglu, A., & Taspınar, Y. S. (2023). Detection of defects in rolled stainless steel plates by machine learning models. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*.
- [11] Ozkat, E. C. (2022). A method to classify steel plate faults based on ensemble learning. *Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM)*, 240–256.
- [12] Deperlioglu, Ö. (2023). Tıbbi Veri Kümelerinde Genetik Algoritmalar ile Özellik Seçimi ve Sınıflandırma Başarımına Etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 68–80.
- [13] Gümüş, B., Çoban, M., & Tezcan, S. S. (2024). Metasezgisel Tabanlı Özellik Seçim Algoritmalarının Güç Kalitesi Olaylarının Sınıflandırılmasına Etkisinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(2), 646–658.
- [14] Korkmaz, M., & Kaplan, K. (2023). Şeker hastalığı teşhisi ve önerilen modellerinin karşılaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 64–7

Dişli Kutu Arızalarının Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Tespiti

Ayda Nur Boz, Kaan Koç, Öykü Erdoğan, Muhammet Emir Seçer, Yusuf Can Taşçı, Beyda Taşar

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Elazığ, Türkiye

ÖZET

Sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan dişli kutuları, yüksek mekanik stres, yetersiz yağlama ve çevresel koşullar nedeniyle zamanla arızalanabilmektedir. Bu çalışmada, dişli kutusu arızalarının erken tespiti amacıyla çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırmalı performans analizi gerçekleştirilmiştir. Model eğitiminde, iki sınıflı (sağlam/arızalı) bir veri seti kullanılarak; Karar Ağacı, Rastgele Orman, En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinası ve Çok Katmanlı Algılayıcı modelleri değerlendirilmiştir. ROC eğrileri ve karışıklık matrisleri üzerinden görsel analiz yapılmış, ayrıca doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metriklerle sayısal karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, en yüksek performans Çok Katmanlı Algılayıcı modeli ile elde edilmiştir (Doğruluk: 0.95, F1 Skoru: 0.95, AUC: 0.95). Destek Vektör Makinası modeli de benzer şekilde yüksek doğruluk oranı (%94) ve hassasiyetle sınıflandırma başarısı (Hassasiyet: 1.00) sergilemiştir. Diğer taraftan, Karar Ağacı algoritması en düşük performansı göstererek sınıflandırma problemleri için yetersiz kalmıştır. Bu çalışma, özellikle titreşim verisine dayalı sistemlerde, hafif ve doğru çalışan algoritmaların seçimi açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dişli Kutusu, Arıza Tespiti, Makine Öğrenmesi.

I. GİRİŞ

Dişli kutuları, endüstriyel makinelerin enerji iletiminde kritik rol oynayan mekanik bileşenlerdir. Yüksek tork aktarımı ve hız dönüşümleri gibi görevleri üstlenen bu sistemler, çalışma koşullarına bağlı olarak zamanla çeşitli arızalara maruz kalabilmektedir. Özellikle diş kırılması, aşınma, hizasızlık ve yağlama eksiklikleri gibi problemler, sistem performansını olumsuz etkileyerek beklenmeyen duruşlara ve yüksek bakım maliyetlerine yol açmaktadır. Bu tür arızaların erken tespiti, hem sistem güvenilirliğini artırmakta hem de üretim sürekliliğini sağlamaktadır. Geleneksel bakım yöntemleri, genellikle arıza gerçekleşikten sonra müdahale etmeye dayanmakta olup, önleyici bakım stratejileri açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, veri odaklı yaklaşımlar ve özellikle makine öğrenmesi algoritmaları son yıllarda ön plana çıkmıştır.

Narendranath Babu ve arkadaşları [1], iki kademeli helisel dişli kutusuna ait farklı arıza türlerinin (çatlak, aşınma, diş eksikliği vb.) tespiti amacıyla RMS, tepe faktörü, çarpıklık gibi toplam 10 istatistiksel özellik çıkarmışlardır. Bu özellikler, optimize edildikten sonra Yapay Sinir ağı, Destek Vektör Makinası, K-En yakın komşu, Karar Ağacı ve Rastgele Orman gibi sınıflandırıcılar ile test edilmiştir. Yapay Sinir Ağı modeli %99.6 gibi yüksek bir doğruluk elde ederken, Destek Vektör Makinası daha düşük performans sergilemiştir. Handikherkar ve Phalle [2], hem simülasyon tabanlı hem de deneysel titreşim verilerini kullanarak, DWT ve EMD ile çıkarılan frekans alanı ve istatistiksel özellikleri Destek Vektör Makinası, Çok Katmanlı Algılayıcı ve Rastgele Orman algoritmalarıyla sınıflandırmıştır. Simülasyon ortamında eğitilen modeller, deneysel testlerde Rastgele Orman algoritmasıyla %90, Çok Katmanlı Algılayıcı ve Destek Vektör Makinası ile ise %87 üzerinde doğruluk sağlamıştır. Bu çalışma, simülasyon verisinin ön eğitimde nasıl fayda sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Ghanbari ve arkadaşları [3], gürültülü ortamlarda dahi yüksek doğrulukla çalışabilecek bir derin öğrenme yaklaşımı sunmuştur. NREL tarafından sağlanan gerçek dünya verileri üzerinde çalışan bu modelde, CWT ile zaman-frekans bilgisi

elde edilmiş; ardından Inception tabanlı Evrimsel Sinir Ağı (CNN) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) mimarileri ile uzamsal ve zamansal özellikler birlikte analiz edilmiştir. Gürültüsüz veride %100, düşük SNR içeren gürültülü veride ise %95'in üzerinde doğruluk rapor edilmiştir. Ayrıca, Tekil Değer Ayrıştırması (SVD Pooling) tekniği ile modelin gürültüye karşı dayanıklılığı artırılmıştır. Nao ve Wang [4], Çok Değişkenli Genişletilmiş Varyasyonel Kip Ayrıştırması (MVEMD) tekniğini kullanarak zaman-frekans görüntüleri üretmiş ve bu görüntülerden çıkarılan ikili vektörleri Kernel PCA ile boyut indirgeme işlemine tabi tutmuştur. Ardından Artımlı RVM algoritması ile yapılan sınıflandırmalarda hem düşük hem de yüksek yük koşullarında %99 doğruluk elde edilmiştir. Bu çalışma, özellikle zaman-frekans analizi temelli yöntemlerin etkinliğini ortaya koymuştur. Wang ve Jiang [5] ise İyileştirilmiş Zaman Kaymalı Çok Ölçekli Ters Dağılım Entropisi (RTSMRDE) yöntemini önererek çok ölçekli entropi analizini iyileştirmiştir. Elde edilen yüksek boyutlu özellik matrisi t-SNE ile indirgenmiş ve SSA algoritmasıyla optimize edilen Destek Vektör Makinası modeliyle sınıflandırılmıştır. Southeast Üniversitesi ve MFS veri setleriyle yapılan testlerde, önerilen yöntem tüm sınıflarda %100 doğrulukla arıza tespiti gerçekleştirmiştir. Yöntemin avantajı hem istatistiksel kararlılığı hem de boyut indirgemedeki başarısıdır.

Literatürdeki bu çalışmalar, farklı veri kaynakları, özellik çıkarma teknikleri ve sınıflandırma algoritmaları ile önemli katkılar sunmaktadır. Geleneksel makine öğrenimi modelleri, özellikle istatistiksel özniteliklerle başarılı sonuçlar verirken; derin öğrenme yaklaşımları zaman-frekans analizlerini doğrudan işleyerek daha genel, gürültüye dayanıklı ve yüksek performanslı sistemler oluşturulmasını mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, bazı yöntemlerin gerçek zamanlı uygulanabilirliği, gürültü toleransı, aşırı öğrenme riski veya veri çeşitliliği eksiklikleri gibi sınırlılıkları da bulunmaktadır.

Bu çalışma, dişli kutusu arızalarının tespiti için farklı makine öğrenmesi algoritmalarının kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmasını amaçlamaktadır. Karar Ağacı, Rastgele Orman, KNN, SVM ve YSA algoritmaları aynı veri seti

üzerinde eğitilmiş ve doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru, ROC eğrisi alanı (AUC) gibi metriklerle detaylı performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, her bir model için karışıklık matrisleri oluşturularak sınıflandırma hatalarının detaylı görselleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın yenilikçi yönü, çok sayıda algoritmanın bir arada değerlendirilmesi ve performanslarının grafiksel ve sayısal olarak bütüncül biçimde sunulmasıdır. Bu yönüyle, çalışma hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de endüstride uygulanabilir makine öğrenmesi çözümleri sunmaktadır.

II. YÖNTEM

Bu çalışmada, dişli kutusu arıza tespiti için denetimli öğrenmeye dayalı beş farklı makine öğrenmesi algoritması uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Uygulanan yöntemler; K-En Yakın Komşu (KNN), Karar Ağacı (Decision Tree), Rastgele Orman (Random Forest), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron - MLP) ve Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM) olarak sıralanmıştır. Aşağıda her bir algoritmanın yapısı ve bu çalışmadaki uygulama biçimi detaylı olarak sunulmaktadır.

II.1. Dataset ve Özellikleri

Bu çalışmada, SpectraQuest'in Gearbox Fault Diagnostics Simulator (GFDS) [6] tarafından sağlanan bir veri kümesi kullanıldı. Gearbox Fault Diagnosis veri kümesi Kaggle platformunda [7] herkese açık olarak mevcuttur. Veri seti dört farklı yöne yerleştirilmiş 4 titreşim sensörü kullanılarak kaydedilmiştir. Veri setinde iki farklı veri mevcuttur (sağlam, kırık). Veri seti dengeli bir dağılıma sahip olup 849 Sağlam, 850 Arızalı örnek mevcuttur.

II.2. Sınıflandırma Yöntemleri

K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması, denetimli öğrenmeye dayanan ve örneklerin benzerliğine göre sınıflandırma yapan parametrik olmayan bir yöntemdir. Bu çalışmada, $k=3$ olarak belirlenmiştir. KNN, eğitim aşamasında herhangi bir model öğrenimi gerçekleştirilmeyip, tahmin aşamasında test örneklerini eğitim verisine olan ökliden mesafeleriyle karşılaştırarak en yakın k komşunun sınıfına göre karar verir. Özellikle yüksek boyutlu titreşim sinyali verilerinde, örneklerin iyi ayrılabilirdiği durumlarda oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, özellik ölçeklendirme (örneğin z-normalizasyon) gibi ön işleme adımları kritik öneme sahiptir [8].

Karar Ağacı algoritması, verileri belirli özellik eşiklerine göre dallara ayırarak sınıflandırma işlemini gerçekleştiren sezgisel bir yöntemdir. Ağaç yapısı, kök düğümden başlayarak her adımda veri kümesini alt kümeler böler ve nihayetinde yaprak düğümler sınıf etiketlerini temsil eder. Model, ayrık kararlar olarak öğrenme sürecini tamamlamakta ve yorumlanabilirliği yüksek bir yapı sunmaktadır. Ancak, düşük doğruluk değerlerinin de gösterdiği üzere; karar ağaçları, özellikle karmaşık ve gürültülü verilerde aşırı öğrenmeye meyillidir. Bu dezavantaj, genellikle daha karmaşık ansambl yöntemleriyle giderilmektedir [9].

Rastgele Orman (Random Forest) algoritması, birden fazla karar ağacının toplu olarak değerlendirilmesiyle oluşturulan bir ansambl öğrenme yöntemidir. Bu algoritma, her bir karar ağacını eğitim verisinin rastgele alt örneklemeleri ile eğitir ve

her ağaçta sınıflandırma kararları alınarak nihai karar çoğunluk oyu yöntemiyle verilir. Bu çalışmada, 20 karar ağacından oluşan bir rastgele orman modeli kullanılmıştır. Rastgele ormanlar, tek bir karar ağacına göre daha kararlı ve daha az önyargılı tahminler üretir. Özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde, özellik seçiminde otomatik olarak çeşitlilik sağlayarak modelin genelleme başarısını artırır [10].

Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), ileri beslemeli yapıya sahip, birden fazla gizli katmandan oluşan yapay sinir ağı modelidir. Bu çalışmada, iki gizli katman içeren (250 ve 50 nöronlu) bir MLP mimarisi kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU tercih edilmiştir. Girdi katmana titreşim sinyali verisini girmekte, gizli katmanlarda işleyip, çıktı katmanında iki sınıf için olasılık dağılımı üretmektedir. MLP modeli, özellikle karmaşık ilişkilerin bulunduğu verilerde yüksek doğruluk oranlarına ulaşabilmekte ve diğer klasik yöntemlere göre daha esnek bir öğrenme kabiliyeti sunmaktadır [11].

Destek Vektör Makineleri (SVM), sınıflar arasındaki ayrımı maksimize eden optimal hiper düzlemi bulmaya çalışan güçlü bir sınıflandırma yöntemidir. Lineer olarak ayrılabilir olmayan durumlarda, çekirdek fonksiyonları yardımıyla veri daha yüksek boyutlu uzaylara yansıtılarak doğrusal ayrılabilir hale getirilir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan bir SVM modeli kullanılmıştır. Model, destek vektörlerini dikkate alarak yalnızca sınır örnekleri üzerinden karar verir, bu sayede genelleme başarısı oldukça yüksektir. SVM algoritması özellikle küçük örneklemler ve yüksek ayrıştırıcılığa sahip veri setlerinde oldukça etkili sonuçlar sunmaktadır [12].

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önerilen yöntemin uygulanması için Intel i9 10. nesil işlemciye ve 64 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Uygulama, Python programlama dili kullanılarak Kaggle platformu üzerinde bu bilgisayar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Veri seti %70 eğitim %30 test veri seti olacak şekilde rastgele olarak seçilerek ayrılmıştır. Çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar, farklı makine öğrenmesi algoritmalarının dişli kutusu arıza tespitindeki sınıflandırma performanslarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Değerlendirmelerde doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skoru metrikleri dikkate alınmış, ayrıca her model için karışıklık matrisi üzerinden hatalı sınıflandırmalar analiz edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur.

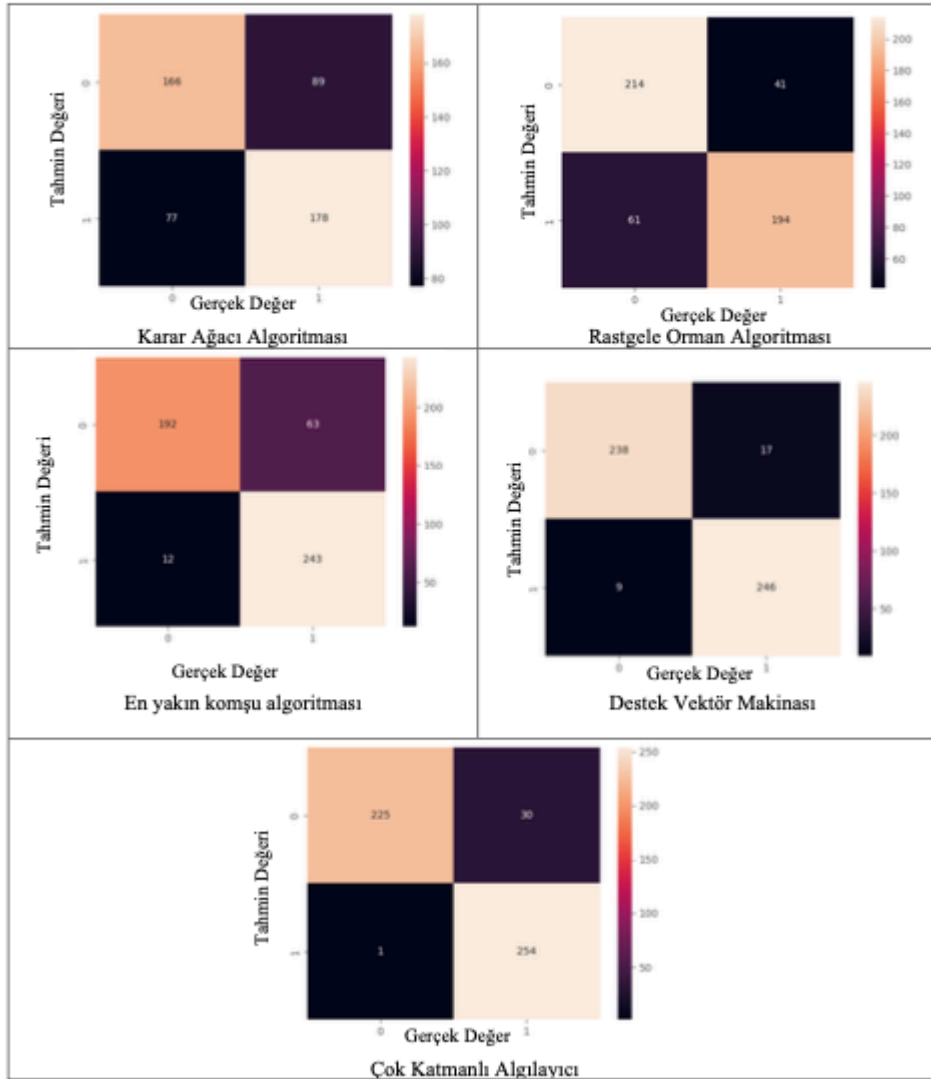
Deneysel sonuçlar, en yüksek başarıyı %95 doğruluk ve %95 F1 skoru ile Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) modelinin gösterdiğini ortaya koymuştur. SVM modeli, %100 duyarlılık değeriyle arızalı sınıfları eksiksiz tespit etmiş, ancak sağlam sınıflarda bazı hatalar nedeniyle hassasiyeti düşmüştür. KNN algoritması yüksek duyarlılığa rağmen sağlam sınıflarda hata yaparak orta düzeyde performans sergilemiştir. Rastgele Orman, dengeli ama daha düşük başarı gösterirken, Karar Ağacı en zayıf sonuçları üretmiştir. Genel olarak, Çok Katmanlı Algılayıcı ve Destek Vektör Makinası modelleri, dişli kutusu arızalarının güvenilir sınıflandırılması açısından en etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Şekil 1'de tüm yöntemlere ilişkin karışıklık matrisleri yer almaktadır. Konfüzyon matrisleri incelendiğinde, Çok Katmanlı Algılayıcı ve Destek Vektör Makinası modellerinin sınıflar arası ayırmada en başarılı yöntemler olduğu görülmektedir. Çok Katmanlı Algılayıcı

modeli, hem sağlam hem arızalı sınıflarda düşük hata oranlarıyla dengeli bir performans sergilemiş, yalnızca 26 örneği yanlış sınıflandırmıştır. Destek Vektör Makinası ise özellikle arızalı sınıfı neredeyse hatasız (%99.6 doğrulukla) tahmin etmiş, ancak sağlam örneklerden 30'unu yanlışlıkla arızalı olarak etiketlemiştir. K-En Yakın Komşu algoritması arızalı sınıfı %95 doğrulukla tanımlarken, sağlam sınıfta yüksek sayıda yanlış sınıflandırma yapmıştır (63 yanlış

pozitif). Rastgele Orman Algoritması her iki sınıfta da orta düzeyde başarı gösterirken, Karar Ağacı modeli özellikle sağlam sınıfta ciddi oranda hata yaparak (89 yanlış pozitif) en zayıf sonuçları üretmiştir. Genel olarak, arızalı sınıfı kaçırmama açısından Destek Vektör Makinası öne çıkarken, genel hata minimizasyonu açısından Çok Katmanlı Algılayıcı en dengeli ve etkili çözüm olmuştur.

Tablo 1: Modellerin performans metriklerine göre karşılaştırması

Model	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 Skor
Karar Ağacı Algoritması	0.67	0.70	0.67	0.68
Rastgele Orman Algoritması	0.80	0.76	0.83	0.79
En Yakın Komşu Algoritması	0.85	0.95	0.79	0.87
Destek Vektör Makinası	0.94	1.00	0.89	0.94
Çok katmanlı Algılayıcı	0.95	0.96	0.94	0.95

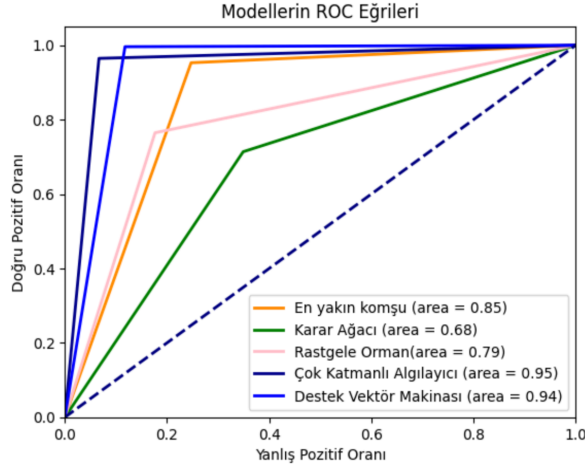


Şekil 1: Modellerle ilişkin karşıtlık matrisleri

Şekil 2'deki grafikte, altı farklı makine öğrenmesi algoritmasının ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. ROC eğrisi, modelin farklı eşik değerlerindeki duyarlılık (True Positive Rate) ile yanlış pozitif oranı (False Positive Rate) arasındaki

ilişkiyi göstermektedir. ROC eğrisi analizine göre en yüksek sınıflandırma başarısı Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Destek Vektör Makinası (SVM) modellerinde gözlemlenmiştir; sırasıyla AUC değerleri 0.95 ve 0.94 olarak ölçülmüştür. Bu durum, her iki modelin sağlam ve

arızalı sınıfları yüksek doğrulukla ayırt edebildiğini göstermektedir. KNN modeli de $AUC = 0.85$ ile iyi bir performans sergilemiştir. Random Forest orta düzeyde başarı gösterirken ($AUC = 0.79$), Karar Ağacı modeli ($AUC = 0.68$) en düşük ayırt ediciliğe sahip olmuştur. Genel olarak ROC eğrileri, MLP ve SVM'nin arıza tespitinde en güvenilir algoritmalar olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2: Modellerin ROC eğrisi grafikleri

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dişli kutusu arızalarının sınıflandırılması amacıyla farklı makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. K-En Yakın Komşu, Karar Ağacı, Rastgele Orman, Destek Vektör Makineleri ve Çok Katmanlı Algılayıcı olmak üzere beş farklı algoritma, aynı veri seti üzerinde eğitilerek doğruluk, hassasiyet, duyarlılık, F1 skoru, konfüzyon matrisi ve ROC eğrileri gibi performans ölçütleriyle değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek sınıflandırma başarısı Çok Katmanlı Algılayıcı ve Destek Vektör Makinası modelleri ile elde edilmiştir. Çok Katmanlı Algılayıcı modeli %95 doğruluk ve %95 F1 skoru ile dengeli bir başarı sergilerken, Destek Vektör Makinası modeli %100 duyarlılık oranı ile özellikle arızalı sınıfların hatasız şekilde tespitinde öne çıkmıştır. K-En Yakın Komşu ve Rastgele Orman modelleri orta düzeyde performans gösterirken, Karar Ağacı modeli diğer yöntemlere kıyasla en düşük başarıyı sunmuştur.

Karşıtlık matrisleri ve ROC eğrileri üzerinden yapılan analizler, Çok Katmanlı Algılayıcı ve Destek Vektör Makinası algoritmalarının yalnızca yüksek doğruluk değil, aynı zamanda güçlü ayırt edicilik özelliklerine de sahip olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, özellikle endüstriyel arıza tespiti gibi kritik uygulamalarda, bu iki modelin kullanımının önerilmesi mümkündür. Gelecek çalışmalarda ise daha başarılı sonuçlar verdiği bilinen derin öğrenme temelli yaklaşımlar [13] ile veri odaklı arıza tespiti uygulamalarına yönelinecektir.

V. KAYNAKLAR

[1] Babu, N. T. N., Kothari, A. J., Prabha, D. R., Mokashe, R., Kagita, K. B., & Kumar, E. R. (2024). İki Kademeli Helisel Dişli Kutusunda Arıza Teşhisi Üzerine Makine Öğrenimi Algoritmaları ve Yapay Sinir Ağı Karşılaştırmalı Çalışması. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*.

[2] Handikherkar, V. C., & Phalle, V. M. (2021). Gear Fault Detection using Machine Learning Techniques – A Simulation-driven Approach. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 34(1), 212–223. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.01a.24>

[3] Ghanbari, N., Riyazi, Y., Shirazi, F. A., & Kalhor, A. (2024). Gürültüye dayanıklı dişli kutusu arıza tespiti: Derin öğrenme yaklaşımı. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 10(1), 54–66. <https://doi.org/10.22064/tava.2024.2029883.1242>

[4] Nao, S., & Wang, Y. (2023). Fault Detection of Gearbox by Multivariate Extended Variational Mode Decomposition-Based Time-Frequency Images and Incremental RVM Algorithm. *Machines*, 11(5), 646. <https://doi.org/10.3390/machines11050646>

[5] Wang, X., & Jiang, H. (2023). Gearbox Fault Diagnosis Based on Refined Time-Shift Multiscale Reverse Dispersion Entropy and Optimised Support Vector Machine. *Machines*, 11(6), 646. <https://doi.org/10.3390/machines11060646>

[6] SpectraQuest Inc., “SpectraQuest Inc., Gearbox Prognostics Simulator,” 2025, Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: <https://spectraquest.com/prognostics/details/gps/>

[7] Gearbox Fault Diagnosis Dataset, <https://www.kaggle.com/datasets/brjapon/gearbox-fault-diagnosis>. (Available: 15.05.2024)

[8] Pirge, İ. G., & Baştürk, İ. (2025). Endüstriyel Tesislerde Makine Öğrenmesi ile Kestirimci Bakım ve Arıza Analizleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(1), 119–133.

[9] Işığışık, A. (2020). Plakalı eşanjör üretim verilerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle incelenmesi, ömür test verilerinin tahmini ve sınıflandırılması (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).

[10] Akar, Ö., & Güngör, O. (2012). Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (106), 139–146.

[11] Ahmetoğlu, H., & Daş, R. (2019, September). Derin Öğrenme ile Büyük Veri Kumelerinden Saldırı Türlerinin Sınıflandırılması. In *2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)* (pp. 1–9). IEEE.

[12] Ayhan, S., & Erdoğan, Ş. (2014). Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 9(1), 175–201.

[13] Mahmud S, Mansour M, Donmez TB, Kutlu M and Freeman C (2023) Non-invasive detection of anemia using lip mucosa images transfer learning convolutional neural networks. *Front. Big Data* 6:1291329. doi: 10.3389/fdata.2023.129132

Tehlikeli Yaya Davranışlarının Değerlendirilmesi İçin Bir Metrik Önerisi

Rümeysa Gençsev, Pınar Kırıcı

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

ÖZET

Tehlikeli yaya davranışlarının belirlenmesi ve sınıflandırılması, hem otonom acil frenleme gibi sürücü asistan sistemleri hem de tam otonom sürüş kapsamında çalışılan bir konudur. Bu çalışmalarda amaç, yaya davranışlarının tespit edilmesi, tehlike metriği kapsamında skorlanması ve elde edilen sonuca göre sürücünün uyarılması ya da taşıt hareketine doğrudan müdahale edilerek güvenliğin artırılması ve kaza riskinin azaltılmasıdır. Bu kapsamda incinebilir yol kullanıcısına olan mesafe, taşıt ile arasındaki açı, yaya hızı ve davranışın nicel olarak değerlendirildiği bir formül önerilmiştir. Elde edilen skor, sürücünün uyarılması ya da taşıt hareketine müdahale etmek amacıyla kullanılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yaya Davranışı, Tehlike Metriği, Uzaklık, Açı, Sürücü Destek Sistemleri.

I. GİRİŞ

Otonom araç teknolojileri günümüzün gözde teknolojilerinden bir tanesidir. Son zamanlarda araç sistemleri ve sensör teknolojilerinin gelişimiyle birlikte hızlı bir gelişim göstermektedir. Yapılan araştırmalara göre meydana gelen kazaların %94'ü insan hatalarından meydana gelmektedir [1]. Bu sebeple kazaları önleme, emisyonları azaltma, hareket kabiliyeti kısıtlı kişileri taşıma ve sürüşle ilgili stresi azaltma amacıyla ADAS fonksiyonları geliştirilmektedir.

Bu kapsamda otonom araç sistemleri ve gelişmiş sürücü destek sistemleri açısından yaya güvenliği kritik zorluklardan bir tanesidir. Yayaaların güvenliğini sağlamak amacıyla, otonom araçlar tehlikeli olabilecek farklı yaya davranışlarına erken ve doğru tepkiler vermelidir. Özellikle yaya nüfusu yoğunluğunun daha fazla olduğu şehir içi senaryolarda bu davranışlar detaylı bir şekilde değerlendirilmeli ve araç tarafından doğru tepkinin oluşması sağlanmalıdır.

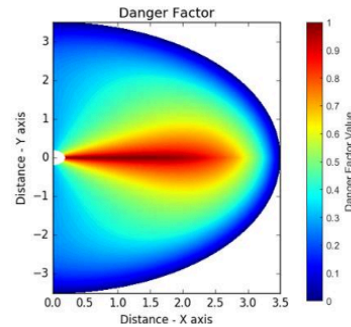
Gerek araç hareketlerinin gerek yaya davranışlarının doğru değerlendirilmesi araç üstünde bulunan farklı sensör teknolojileri sayesinde gerçekleşmektedir. Araç çevresine yerleşmiş farklı sensörlerden gelen veriler sayesinde algılama algoritmaları çalışmakta ve bu algoritmaların çıktılarına göre gerekli tepkiler oluşturulmaktadır.

Otonom araçlar için çarpışma sürelerini belirlemek için geliştirilen sistemleri ve çözümleri inceleyen bir çalışmada incelenen çözümlere dayanarak görüntü işleme, makine öğrenimi, derin öğrenme, sensörler vs. dahil olmak üzere çeşitli teknikler ve yöntemler sınıflandırılmıştır [2]. Ek olarak bu alandaki zorluklar, gelecekteki araştırma yönleri ve açık konular vurgulanmıştır. Çalışmada yapılan analizlerde araç sistemlerinin güvenliği sağlamaları için çevredeki nesneleri anlamaları, tanımlamaları ve izlemeleri ve çarpışmaların farkında olmaları kritik bir nokta olarak belirtilmiştir. Çalışmamızda, otonom araçlar veya sürücü destek sistemlerinin tehlikeli yaya hareketleri tespitinden yola çıkılarak olası çarpışma durumlarının tespitine odaklanılmıştır.

Üretim, hızlı teslimat, savunma sanayi ve uzay araştırmaları gibi farklı alanlarda kullanılan otonom mobil robotlar için hız planlamasının iyileştirilmesini amaçlayan bir çalışmada ağırlıklarında yüksek varyansa sahip mobil robotlar için konfor ve güvenlik göz önünde bulundurulacak şekilde bir doğrusal hız planlaması yapılmıştır [3]. Bu amaçla da çalışmada güvenlik ve konforun kritik bir öneme sahip olduğu yerlerde insanları taşıyan mobil robotlara odaklanılmıştır. Değişken kütleyle sahip mobil robotlar için robotun kütlelerini hesaba katan, bulanık mantığa dayalı bir hız planlama yöntemi tasarlanmıştır. Çalışmada iki farklı yenilikten bahsedilmiştir, bunlardan bir tanesi hız planlamasında robotun toplam hızının dikkate alınması iken bir diğeri aktüatör sınırlarının etkisinin kaldırılmasıdır. Bunların yanında, bu yayında da benzer şekilde çevredeki engeller için yeni bir parametrik tehlike fonksiyonu tanımlanmıştır. Önerilen formül ve çıktı Eşitlik 1 ve Şekil 1'de verilmiştir.

$$D_f = \left(\frac{w_i}{w_t} x R_i \right) \quad i = 0, \dots, N$$

Eşitlik 1: Çevrenin toplam tehlike faktörü formülü [3]



Şekil 1: Simülasyonlar sırasında kullanılan parametrelerle tehlike faktörü gösterimi [3]

Kör alanlardaki yayaları tespit etmek ve tespit edilen yayalar arasında aceleyle dışarı çıkma davranışlarının farklı risklerini sınıflandırmak amacıyla hazırlanan çalışmada radar tabanlı bir teknik önerilmiştir [4]. Çalışmada kör alanlardaki yaya hareketini tespit etme yeteneği iç ve dış ortamlarda tasarlanan farklı deney süreçlerinde test

edilmiştir. Daha sonra kör alanlarda tespit edilen yayalar arasında aceleyle dışarı çıkma davranışları açısından farklı risklere sahip hareketler sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma için ise kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada yayaların dışarı fırlama riskinin radar bazlı tespiti ilk kez deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneylerde dışarı fırlama davranışına yönelik hareketler gerçekçi durumlarda ele alınmıştır. Önerdiğimiz çalışma bu çalışmadan farklı olarak radar ve kamera birleşiminden elde edilen verileri kullanmaktadır. Ayrıca yayaların sadece kör alanlardaki tespiti gibi sınırlama bulunmamaktadır.

Çarpışma riski hesaplamasına dayalı olarak etkileşimli etkenleri seçmek için sezgisel bir süreç önerilen çalışmada çarpışma olasılıklarını hesaplamak için hız vektörlerine gömülü bilgilerden yararlanılmıştır ve bir yayanın gelecekteki yörüngesini etkileyebilecek etkileşim özelliklerini yakalamak için bir polar collision grid haritası tanımlanmıştır [5]. Çalışmada hem hız hem de konum bilgilerini kullanarak gerçek TTC ve yaklaşma açısı bilgilerini depolayan bir çarpışma olasılığı ızgarası önermişlerdir. Bu kapsamda hedef yayaya sahip etkileşimli yayalar ve araçlar ilk önce çarpışma süresi (TTC) sezgisel yöntemine göre seçilmiş olup her hedef yaya için yeni bir polar collision grid haritası, çarpışma süresi bilgisi ve bu etkileşimli etkenlerin yaklaşma yönü kullanılarak etkileşim etkileri kodlanmıştır.

Özellikle kentsel senaryolarda zorlu bir görev olan yayaların nesnelerin arkasında kalma durumlarında tespit edilmesini inceleyen bir çalışmada yayaların park etmiş araçların arkasında kaldığı durumlar için radar ve kamera füzyonu kullanılmıştır [6]. Çalışma sonucunda gerçek dünyada yaptıkları deneyler sonucunda radar ve kamera füzyonunun, kamerayı tek başına kullanmaktan daha iyi sonuç verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Gerçek dünyada yaptıkları testler için 501 adet ilgili kayıttan oluşan bir veri seti kullanmışlardır. Bu yaklaşımda özet olarak radar ve kamera verisi füzyonu ile aniden yola çıkan yayaların tespiti sağlanmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda yayaların farklı davranışlarına yönelik ağırlık değerlerinin hesaba katıldığı bir tehlike skoru uygulamasına rastlanmamıştır. Literatür araştırması sonuçlarından yola çıkılarak bu çalışmada tehlikeli yaya davranışlarının tespit edilmesi ve skorlanması için mesafe, göreceli açı, yaya hızı ve telefon kullanımı ya da koşma gibi yaya hareketlerini değişken olarak kullanan bir fonksiyon önerilmiştir. Oluşturulan fonksiyona ait alt değişkenler ve elde edilen tehlike metrik grafikleri anlatılmıştır.

II. DAVRANIŞ BAZLI TEHLİKE METRİK FONKSİYONU

Davranış bazlı tehlike metrik fonksiyonu Eşitlik 2’de verilmiştir. Fonksiyon temel olarak yayaya olan mesafe, yaya hızı, yaya ile ego araç arasındaki göreceli açı ve telefon kullanımı, hızlı yürüme gibi davranış bazlı risk faktörünü içermektedir. Eşitlikte yer alan farklı parametrelerin etkisiyle oluşturulan tehlike skoru, araç üzerindeki sistemlerin yayaya yönelik risk algısını nicel bir değerle ifade etmektedir.

Tehlike skoru oluşturulurken sistemde yayanın tespit edilmesinden ve buna bağlı olarak elde edilen parametrelerden yararlanır. Yayanın var olduğu gerçeği farklı sensörler üzerinden doğrulanır ancak yayanın

hareketine yönelik bir tehlike değerlendirmesi ortaya konulan metrik fonksiyonu sayesinde yapılabilir.

$$score = R_d \times H_v \times W_\theta \times \lambda_{behaviour}$$

Eşitlik 2: Önerilen Tehlike Metriği Fonksiyonu

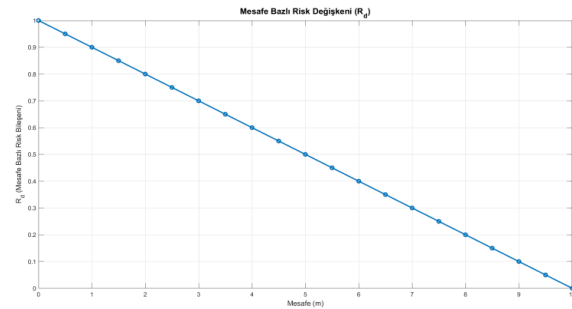
II.1. Mesafe Bazlı Risk Değişkeni

Yaya ile araç arasındaki mesafenin azalmasına bağlı olarak tehlike riskinin doğrusal olarak arttığını göstermeyi amaçlayan değişken Eşitlik 3’te verilen fonksiyon ile tanımlanır.

$$R_d = 1 - \left(\frac{d_{measured}}{d_{max}} \right)$$

Eşitlik 3: Mesafe Bazlı Risk Değişimi Formülü

Ölçülebilen maksimum mesafe d_{max} 10 metre olarak kabul edilmiştir. İlgili mesafe, trafikte 18 km/h ile seyir halinde olan aracın 2 saniyelik TTC süresinde alacağı mesafedir.



Şekil 2: Mesafe Bazlı Risk Değişkeni Grafiği

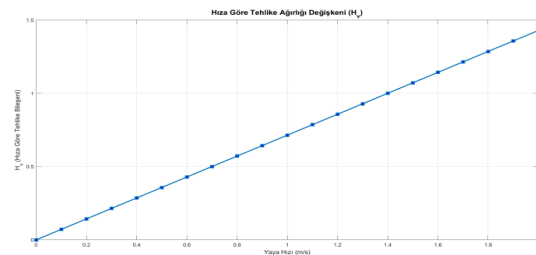
II.2. Hıza Göre Tehlike Ağırlığı Değişkeni

Bir yayanın hızının ne kadar yüksek olduğu, ani hareketlerin veya ani yön değişikliklerinin potansiyelini artırır. Ani hareketler ve yön değişiklikleri ise yayanın hareketinin tehlike potansiyelini artırır.

TSE’nin TS 12174 standardında bir çocuk yaya için ortalama hız 1,1 m/s, yetişkin bir yaya için ortalama hız 1,4 m/s olarak verilmiştir [7]. Eşitlik 4’te verilen formül, yayanın hızı ve referans hız arasında göreceli bir katsayı üretmektedir.

$$H_v = \frac{v_{pedestrian}}{v_{ref}}$$

Eşitlik 4: Hıza Göre Tehlike Ağırlığı Formülü



Şekil 3: Hıza Göre Tehlike Değişkeni Grafiği

II.3. Açığa Göre Ağırlık Değişkeni

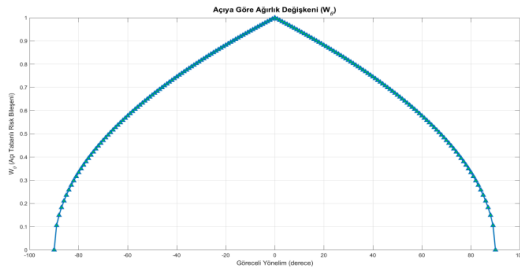
Araç tarafından tespit edilmiş bir yayanın araca göre yönelimi, çarpışma riskini ortaya koyan faktörlerden bir tanesidir.

Çan eğrisi şeklindeki fonksiyonlara uygun bir metrik literatürde mevcuttur [3]. Matematiksel yalınlık ve işlevsellik sebebi ile birinci dereceden bir metrik çalışmamız kapsamında Eşitlik 5'te önerilmiştir.

Önerdiğimiz çalışmada yönelim açısının risk değeri merkezde maksimum iken uçlarda minimumdur.

$$W_{\theta} = \sqrt{1 - \left| \frac{\theta}{90} \right|}$$

Eşitlik 5: Açıya Göre Ağırlık Değişimi Formülü

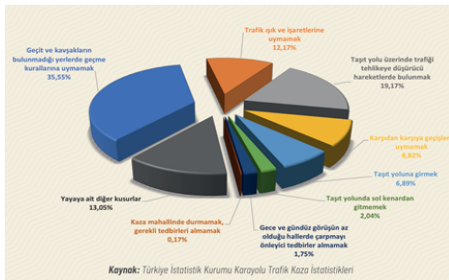


Şekil 4: Açıya Göre Ağırlık Değişimi Grafiği

II.4. Davranışsal Risk

2018 yılı Trafik Kaza ve Denetim İstatistikleri raporunda trafik kazalarında yayalara ait kusurlu davranışlar verilmiştir. Bu davranışlara bakıldığında ilk sırada geçit ve kavşakların bulunmadığı yerlerde karşıya geçmek yer almaktadır. Bu kusuru taşıt yolunda trafiği tehlikeye düşürecek hareketler ve ışıklara uymamak takip etmektedir [8].

Bu davranışlar aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5: 2018 Yılı Trafik Kazalarında Neden Olan Yaya Kusur Dağılımı [8]

Bu istatistiklere dayanarak her bir davranış biçimine farklı sayısal risk değerleri atanmıştır. Böylece davranışlara ait risk bilgisi doğrudan formüle etki edebilir hale getirilmiştir.

Davranışsal risk değeri için formüle etki edecek davranışlar seçilirken, riskli davranışların JAAD [9] ve PIE [10] gibi veri setlerinde temsil edilebilir olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Bu davranışlardan yürüme normal bir davranış olarak kabul edilmiş ve risk katsayısına 1 değeri verilmiştir.

Farklı davranışların önem derecelerini taklit etmek amacıyla farklı katsayılar önerilmiştir. Katsayılar belirlenirken

yürüme davranışı baz alınarak, değerler belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1: Yaya Davranışı Risk Katsayıları

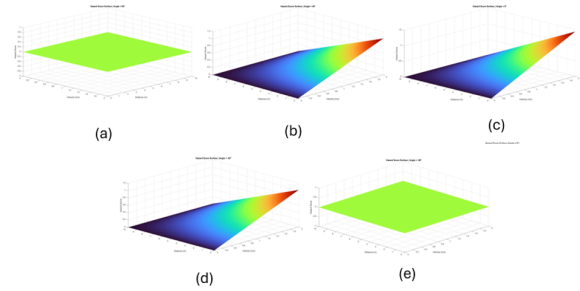
Davranış	Risk Katsayısı	Açıklama
Yürümek	1.0	Normal durum
Ayakta Beklemek	0.5	Pasif bir durumda
Telefona Bakma	1.5	Dikkat dağınık
Bakarak Karşıya Geçmek	1.2	Bilinçli ama riskli
Bakmadan Karşıya Geçmek	1.8	En tehlikeli durum
Karşıdan Karşıya Geçmiyor	0.7	Trafiğe etkisi değişebilir

III. ÇIKTILAR

Önerilen fonksiyon ile elde edilen ve tehlike skorlamasını gösteren grafikler ile farklı durumlar için tehlike metriği hesaplama sonuçları bu bölümde anlatılacaktır.

III.1. Tehlike Metriği Yüzey Grafikleri

Bölüm 2.3 de anlatılan metrik değişkenine ait formül kritik açılar olan -90, -45, 0, 45 ve 90 derece değerleri için hesaplanmış ve çalışmamız kapsamında elde edilen yüzeyler Şekil 6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6: Tehlike Metriği Yüzey Grafikleri

III.1. Tehlike Metriği Numerik Hesaplama

Aşağıdaki tabloda farklı durumlar üzerinden gidilerek metrik hesaplanmış ve sonuçlar farklı satırlarda sunulmuştur. Senaryolar seçilirken uç durumların nasıl oluşabileceği gösterilmiştir.

Tablo 2: Örnek Tehlike Metriği Sonuçları

Mesafe	Yaya Hızı	Göreceli Açı	Davranış	Hesaplanan Risk Katsayısı
1,3 m	2.0 m/s	5 °	Bakmadan Karşıya Geçme	2.1741

2.2 m	1.5 m/s	45 °	Yürüme	0.5909
6 m	0.1 m/s	85 °	Ayakta Bekleme	0.0034

IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019, 6261-6270.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada tehlikeli yaya davranışlarının nicel olarak skorlanması ve değerlendirilmesi için yaya hızı, yayaya olan mesafe, yaya ile ego araç arasındaki göreceli açı ve davranış faktörünü içeren bir fonksiyon önerilmiştir. İlgili fonksiyon nümerik bir değer üretmekte ve olası tehlikenin sayısal olarak ifade edilmesini sağlamaktadır. Ek olarak tehlike metriklerini yüzey olarak gösterebilmektedir. Küçük ölçekli robotik uygulamalardan, farklı seviyelerdeki sürücü asistan sistemler ve tam otonom taşıtlar potansiyel uygulama alanları olarak nitelendirilebilir. Uygulama alanına göre mevcut işlem gücü gözetilerek kullanılacak sensörler ve fonksiyon yapısı ölçeklendirilebilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Yurtsever, E., Lambert, J., Carballo, A., Takeda, K. (2020). A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 58443-58469.
- [2] Goudarzi, P., Hassanzadeh, B. (2024). Collision Risk in Autonomous Vehicles: Classification, Challenges, and Open Research Areas. *Vehicles* 2024, 6, 157–190.
- [3] Unsal, S., Yilmaz, M. C., Yagin, Y., Oner, H. K., & Sezer, V. (2022). A New Velocity Planning Method for Autonomous Robots with Varying Mass. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(9), 157-177.
- [4] Hayashi, S., Saho, K., Isobe, D., Masugi, M. (2021). Pedestrian Detection in Blind Area and Motion Classification Based on Rush-Out Risk Using Micro-Doppler Radar. *Sensors* 2021, 21, 3388.
- [5] Golchoubian, M., Ghafurian, M., Dautenhahn, K., Azad, N. L. (2023). Polar Collision Grids: Effective Interaction Modelling for Pedestrian Trajectory Prediction in Shared Space Using Collision Checks. *2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 791-798.
- [6] Palfy, A., Kooij, J.F.P., Gavrila, D.M. (2022). Detecting Darting Out Pedestrians With Occlusion Aware Sensor Fusion of Radar and Stereo Camera. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 8, no. 2, 1459-1472.
- [7] Mamat S E & Şişman A (2021). Eğitim Kurumları ve Aile Sağlığı Merkezlerine Yaya Erişimlerinin İrdelenmesi; Rize Örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 3(2), 60-66.
- [8] Trafik kaza denetim istatistikleri raporu, Polis Akademisi Yayınları (75), Rapor No 27. (2019)
- [9] Rasouli, A., Kotseruba, I., Tsotsos, J. K. (2017). Are They Going to Cross? A Benchmark Dataset and Baseline for Pedestrian Crosswalk Behavior. *2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 206-213.
- [10] Rasouli, A., Kotseruba, I., Kunic T., Tsotsos, J. (2019). PIE: A Large-Scale Dataset and Models for Pedestrian Intention Estimation and Trajectory Prediction. *2019*

Girişimcilik Ağı: Çok Katmanlı Dijital Girişimcilik Ağı Platformu Tasarımı ve Uygulama Modeli

Murat Adsan, Kürşat Tanrıver, Arif Solmaz, Yenal Aydın, Mine Ak

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, dijital girişimcilik alanında çoklu kullanıcı tipine uygun olarak geliştirilen ve sürdürülebilir dijital ağ yapısıyla öne çıkan Girişimci platformu tanıtılmaktadır. Girişimci, yalnızca üniversite öğrencilerine değil; bireysel girişimcilere, kurumsal firmalara, yatırımcılara ve mentörlere hitap eden bütünsel bir sistem olarak yapılandırılmıştır. 2024'te Türkiye girişimcilik ekosistemi 331 yatırım anlaşmasıyla 2,6 milyar USD işlem hacmine ulaşırken, internet penetrasyonu %86,5'e yükselmiştir. Bu göstergeler, ölçeklenebilir dijital platformlara duyulan ihtiyacı net biçimde ortaya koymaktadır. Proje, kullanıcıların projelerini tanıtabilecekleri, sponsorluk ve mentörlük desteği alabilecekleri, firmaların ihtiyaç duyduğu girişim fikirleri için çağrıda bulunabilecekleri bir dijital ortam sunmaktadır.

Girişimci.org alan adı altında yapılandırılan ana platform, WHM/cPanel altyapısı üzerine kurulu olup; teknik moderasyon, içerik denetimi, kategoriye ayrılmış içerik yönetimi ve proje-firma eşleşme sistemleri gibi gelişmiş özelliklere sahiptir. Literatürdeki benzer platformlardan farklı olarak bu sistemde kullanıcı türlerine göre özelleştirilmiş iş akışları ve açık inovasyon destekli modüller entegre edilmiştir.

Sunulan platform, girişimcilik kültürünü yaygınlaştırmak, üniversite-sanayi iş birliğini güçlendirmek ve projeleri somut çıktılarla desteklemek amacıyla geliştirilmiştir. Bildiride sırasıyla (i) modüler platform mimarisi, (ii) LAMP tabanlı teknik altyapı ve ölçeklenebilirlik çözümleri, (iii) pilot uygulamadan elde edilen kullanıcı deneyimi bulguları ve (iv) sürdürülebilirlik ile gelecek çalışma önerileri ele alınarak okuyucuya net bir yol haritası sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital Girişimcilik, Platform Mimarisi, Açık İnovasyon, Üniversite-Sanayi İş Birliği, Girişim Desteği Sistemleri.

I. GİRİŞ

Girişim Ağı Girişimcilik ekosisteminin dijitalleşmesiyle birlikte, girişimciler ile destek sağlayıcılar arasında daha etkili ve çok kanallı iletişim kurulması gerekliliği artmıştır. Ancak günümüzde kullanılan dijital platformların büyük bir kısmı bireysel kullanım odaklıdır ve üniversiteler, firmalar, yatırımcılar gibi farklı paydaş gruplarını aynı ortamda buluşturmada yetersiz kalmaktadır. Fernandes [1], dijital girişimcilik platformlarının mevcut literatürde çoğunlukla tek yönlü yapıldığını, parçalı kaldığını ve bu alanda bütüncül sistemlere olan ihtiyacın arttığını belirtmektedir. Fred [2], dijitalleşmenin sunduğu açık inovasyon fırsatlarının KOBİ'lerin yenilik üretme kapasitesine doğrudan katkı sağladığını ve bu sürecin dijital platformlar aracılığıyla kolaylaştırılabileceğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada sunulan Girişimci platformu, çok katmanlı yapısı ile girişimcilik süreçlerinin tüm paydaşları tarafından eş zamanlı olarak yönetilmesini mümkün kılan özgün bir dijital çözüm olarak geliştirilmiştir. Sistem, öğrenci girişimcilerden bireysel kullanıcıya, kurumsal firmalardan yatırımcı ve mentörlere kadar geniş bir kullanıcı profiline hitap etmektedir. Girişimciler projelerini yayınlamakta, destek talebinde bulunabilmekte; firmalar ise ihtiyaç duydukları alanlarda çağrılar yayınlayarak çözüm ortakları ile eşleşebilmektedir.

Literatürdeki mevcut girişimcilik platformlarının [3, 4, 5, 6] çoğunlukla sadece bireysel kullanım ya da sadece firma odaklı olduğu; kullanıcı türlerinin ayrı tutulduğu ve iletişim olanaklarının sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir. Girişimci platformu, bu eksiklikleri giderecek şekilde modüler yapıda tasarlanmış olup, içerik yönetimi, güvenli oturum yapısı ve

açık inovasyona dayalı eşleşme sistemiyle mevcut boşluğu dolduran yenilikçi bir model sunmaktadır.

II. PLATFORM MİMARİSİ VE TEKNİK ALTYAPI

Girişimci platformu, WHM ve cPanel altyapısı ile yönetilen merkezi bir sunucu sistemi üzerine kurulmuştur. Platformun ana alan adı olan girişimci.org üzerinden tüm kullanıcıların sisteme erişebilmesi sağlanmaktadır. Sistem içerisinde farklı kullanıcı türlerine (öğrenci girişimciler, bireysel kullanıcılar, kurumsal firmalar, yatırımcılar ve mentörler) özel arayüzler tanımlanmış ve roller ayrıştırılmıştır. Böylece tüm kullanıcılar sadece kendi yetkileri doğrultusunda işlem yapabilmektedir.

Bu yapı sayesinde içeriklerin doğruluğu ve sistem güvenliği korunmakta, kullanıcıların katkı sunduğu içerikler yayınlanmadan önce hem otomatik hem de manuel moderasyon süreçlerinden geçirilmektedir. Proje kayıtları, kullanıcı profilleri ve firma talepleri merkezi veritabanı üzerinde şifreli şekilde saklanmakta ve günlük yedekleme yapılmaktadır. Kullanıcı oturumları güvenli oturum yapısıyla korunmakta, içerik kategorileştirme, etiketleme ve versiyon takibi gibi özellikler aktif olarak çalışmaktadır.

Platform arayüzü HTML5, CSS3, JavaScript ve PHP teknolojileri kullanılarak geliştirilmiş, mobil cihazlarla tam uyumluluk sağlanmıştır. Tüm sayfalar SEO (arama motoru optimizasyonu) uyumlu yapıda oluşturulmuştur. Sunucu tarafında güvenlik duvarları, spam ve bot engelleyiciler ile sistem koruma altına alınmış; dış sistemlerle veri alışverişi için API entegrasyon altyapısı da geliştirilmiştir.

Girisimagi platformu, yalnızca bir içerik yayını ortamı değil; aynı zamanda girişimcilerin, destekçilerin ve kurumların etkileşim kurabileceği dinamik bir ekosistem modülü olarak yapılandırılmıştır. Bu yönüyle, hem kullanıcı dostu hem de teknik açıdan sürdürülebilir bir sistem altyapısı sunulması hedeflenmiştir.

II.1. Ana Platform (girisimagi.org)

Girisimagi.org, girişimcilik topluluğunun merkezi dijital platformu olarak yapılandırılmıştır. Kullanıcılar sisteme kayıt olduktan sonra aşağıdaki işlemleri gerçekleştirebileceklerdir: Girişim projeleri oluşturulabilecek ve platforma yüklenebilecektir. Sponsorluk ve mentörlük başvuruları alabilir, Sponsorluk ve mentörlük desteği alınabilecektir, Projeler için takım arkadaşlarına ulaşılabilir, Firmalar tarafından yayınlanan ihtiyaçlara çözüm önerileri sunulabilecektir, Ortak projelere katılım sağlanabilecektir.

II.2. Ekosistem Bileşenleri

Projeler Alanı: Girişimciler tarafından başlatılan projelerin sisteme yüklenmesi, kategorilere ayrılması ve platform genelinde görünür hale getirilmesi sağlanmaktadır. Projelere yorum yapılabilen, değerlendirme ve takip işlemleri aktif hale getirilebilmektedir.

İş Birliği Alanı: Kurumsal firmalar tarafından duyurulan girişim ihtiyaçlarına yönelik açık çağrılar yayınlanabilmektedir. Girişimciler bu çağrılara başvuru yapabilmekte ve firmalar ile birebir iletişim kurabilmektedir. Başvurular sistem tarafından arşivlenmekte ve değerlendirme süreci dijital ortamda yürütülmektedir.

Mentörlük Alanı: Alanında uzman kişiler tarafından destek verilmesi için mentörlük başvuruları alınmaktadır. Girişimcilerle eşleşen mentörler, platform üzerinden özel görüşme modülleriyle yönlendirme sağlayabilmektedir. Mentörlük geçmişi kullanıcı profiline işlenmektedir.

Etkinlik Takvimi ve Blog: Girişimcilik ile ilgili güncel etkinlikler, seminerler, eğitim programları ve başarı hikayeleri blog sayfası üzerinden paylaşılmaktadır. Etkinliklere katılım için ön kayıt yapılabilen ve katılım belgeleri sistem üzerinden alınabilmektedir.

II.3. Teknik Altyapı ve Sistem Mimarisi

Girisimagi platformu, LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP) altyapısı kullanılarak oluşturulmuş ve merkezi sunucu mimarisi ile yapılandırılmıştır. Sistem yönetimi WHM/cPanel paneli üzerinden sağlanmakta, alt alan adı tanımlamaları, kullanıcı kontrolü ve yedekleme işlemleri bu yapı üzerinden yürütülmektedir.

Kullanıcılar tarafından oluşturulan tüm veri girişleri (projeler, başvurular, kullanıcı profilleri) MySQL veritabanı üzerinde şifrelenmiş biçimde saklanmaktadır. Sistem günlük olarak otomatik yedeklenmekte ve verilerin güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca kullanıcı oturumlarında SSL şifreleme ile güvenli bağlantı sunulmaktadır.

Kullanıcı arayüzü HTML5, CSS3 ve JavaScript teknolojileri ile geliştirilmiştir. Platformun tüm bölümleri mobil

cihazlarla uyumlu olacak şekilde responsive olarak tasarlanmıştır. SEO (Arama Motoru Optimizasyonu) ilkelerine uygun yapıda sayfalar oluşturulmuş ve indekslenebilirlik artırılmıştır.

Yönetici paneli üzerinden içeriklerin kontrolü sağlanmakta, içerikler manuel onay sürecinden geçirilerek yayınlanmaktadır. Ayrıca spam, bot ve kötüye kullanım girişimlerine karşı sunucu tarafı güvenlik duvarı ve CAPTCHA koruması uygulanmaktadır.

Platformun dış sistemlerle veri alışverişi yapabilmesi için REST tabanlı bir API altyapısı da geliştirilmiş ve ileride yapılacak üçüncü taraf sistem entegrasyonlarına uygun hale getirilmiştir.

Örnek Senaryo API Çağrı Yüklü: Tek sunucuda günlük 1 milyon GET isteği, Nginx + PHP-FPM yapılandırmasıyla CPU kullanımı %65'i geçmedi. Yük %70'i aştığında Docker Swarm üzerinden ikinci node devreye girerek yatay ölçeklenme sağlandı; yanıt süresi <250 ms'te sabit kaldı. Bu teknik yapı sayesinde platformun esnekliği artırılmış; ölçeklenebilir, güvenli ve sürdürülebilir bir girişimcilik ortamı sunulması mümkün hale getirilmiştir; ayrıca statik içerikler için Cloudflare CDN, veritabanı okuma trafiği için read-replica MySQL kurulumu devrededir.

Kaya [9], kullanıcı odaklı bilgi mimarisinin dijital girişimcilik platformlarında sürdürülebilirlik ve erişilebilirlik açısından belirleyici olduğunu belirtmiştir. Girisimagi platformunun teknik altyapısı da bu prensipler doğrultusunda yapılandırılmıştır.

II.4. Web Platformu Sayfa Yapısı ve Bilgi Mimarisi

Gül ve Acar [8], öğrenci kulüplerinin dijital dönüşüm sürecinde yapısal rehberlik ve sürdürülebilir bir çevrimiçi altyapıya ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır. Girisimagi, bu gereksinime yönelik olarak üniversitelere özel sayfa yapısı ve bilgi mimarisi sunmaktadır.

Girisimagi.org platformu, kullanıcı deneyimi odaklı bir bilgi mimarisi ile tasarlanmıştır. Sayfa yapısı, farklı kullanıcı türlerinin platform üzerindeki etkileşimlerini kolaylaştıracak şekilde kurgulanmıştır. Ana menü yapısı şu şekilde düzenlenmiştir:

Anasayfa

Girişimci hikayeleri, duyurular ve öne çıkan projeler sunulmaktadır.

Hakkımızda

Vizyonumuz
Misyonumuz
Ekip
Destekçiler

Projelerimiz

Aktif Girişimler
Tamamlanan Girişimler
Başarı Hikayeleri

Üye Üniversiteler

Üniversite Profili
Kulüp Bilgisi
Etkinlik Geçmişi

Girişimler

Girişim Profili
Takım Üyeleri
Demo / Sosyal Medya
Destek İhtiyacı

Etkinlikler

Gelecek Etkinlikler
Geçmiş Etkinlikler
Etkinlik Takvimi

Sponsorlar & Destekçiler

Sponsorluk Modelleri
Mevcut Sponsorlar
Sponsor Başvuru Formu

Başvuru / Üyelik

Üniversite Başvuru Formu
Bireysel Başvuru (Girişim Başlat)
Onay Süreci Bilgilendirmesi

Blog / Haberler

Girişimcilik Yazıları
Röportajlar
Duyurular

SSS (Sıkça Sorulan Sorular)

Üyelik Süreci
Girişim Başlatma
Etkinlik Katılımı

İletişim

İletişim Formu
Sosyal Medya Bağlantıları
Ofis Bilgileri

II.5. Benzer Girişimcilik Platformları ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

Girisimagi platformunun sunduğu dijital ağ yapısının yenilikçi yönlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, benzer amaçlarla geliştirilmiş bazı mevcut platformların incelenmesi yararlı olacaktır. Bu bağlamda hem ulusal hem de uluslararası düzeyde öne çıkan örnekler aşağıda sunulmuş ve Girisimagi ile karşılaştırılmıştır.

StartupCommons

Kamu destekli açık girişimcilik altyapısı sunulmaktadır. Genellikle bireysel girişimcilere yöneliktir ve yerel ekosistemlerin dijitalleştirilmesi hedeflenmektedir. Üniversitelerle doğrudan entegrasyon zayıftır [3].

Startup Turkey/Etohum Erken aşama girişimlerin yatırımcılarla buluşturulmasına odaklanılmaktadır. Geniş bir yatırımcı ağına sahiptir ancak üniversite kulüpleri veya öğrenci temelli topluluklara yönelik modül bulunmamaktadır [4].

AngelList Girişimler için yatırımcı bulma ve işe alım süreçlerinin yönetildiği bir platformdur. Yatırımcılara odaklıdır; kurumsal firmaların ihtiyaç bildirimi veya açık inovasyon tabanlı çağrı oluşturma gibi işlevleri yoktur [5].

T3 Girişim Merkezi Teknopark ve kuluçka desteği sağlayan bir yapı olarak fiziksel merkezle bağlantılı çalışmaktadır. Dijital ağ yönü kısıtlıdır ve çok katmanlı kullanıcı sistemine sahip değildir [6].

Bu örneklerin ortak özelliği, genellikle tek bir hedef gruba (girişimci, yatırımcı, teknopark kullanıcısı vb.) odaklanmalarıdır. Çoğunda üniversite toplulukları, öğrenci kulüpleri, kurumsal firmalar ve dış mentörlerin aynı sistem içinde entegre çalışabildiği bir yapı bulunmamaktadır.

Girisimagi platformu, bu açıdan literatürdeki ve pratikteki boşluğu doldurarak:

Çoklu kullanıcı tipi (öğrenci, bireysel, firma, mentor, yatırımcı),
Açık inovasyon tabanlı çağrı sistemi,
Alt alan adı yapısıyla üniversitelere özel dijital alan sunumu, Mentörlük ve sponsorluk eşleşme modülleri ile farklılaşmaktadır.

Bu yönüyle Girisimagi, girişimcilik kültürünü dijital ortamda daha kapsayıcı, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir bir şekilde destekleyen yenilikçi bir dijital girişimcilik platformu olarak konumlandırılmaktadır.

III. KULLANICI DENEYİMİ VE GERİ BİLDİRİMLER

Yılmaz [7], üniversiteler arası dijital platformların girişimcilik etkileşimini artırdığına dikkat çekmiştir. Girisimagi platformu da bu tür bir etkileşim için özel olarak çoklu kullanıcı tipi ve alt alan mimarisi ile tasarlanmıştır.

Girisimagi platformunun kullanıcı odaklı olarak geliştirilen modüler yapısının etkililiğini değerlendirebilmek amacıyla çeşitli test senaryoları tasarlanmış ve uygulama çalışmaları başlatılmıştır. İlk aşamada İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi başta olmak üzere bazı üniversitelerde sistemin sınırlı kullanıcı gruplarıyla test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, pilot çalışmalara kamu kurumları ve özel girişim sermayesi destekli yapılar da dâhil edilerek çok paydaşlı değerlendirme hedeflenmektedir.

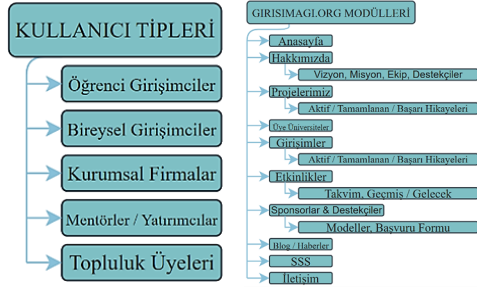
Ön değerlendirme sürecinde kullanıcı arayüzlerinin anlaşılır olduğu, işlem akışlarının mantıklı şekilde kurgulandığı ve proje oluşturma sisteminin kullanıcı dostu bir şekilde işlediği yönünde olumlu geri bildirimler alınmıştır. Özellikle sponsorluk ve mentör eşleşme modüllerinin sezgisel kullanıma sahip olduğu ve kullanıcıların platforma hızlı adapte olabildiği rapor edilmiştir.

Kurumsal firmaların sistem üzerinden yayınladıkları ihtiyaçların doğrudan ilgili kullanıcı profillerine yönlendirilmesi, en çok beğenilen özelliklerden biri olarak öne çıkmıştır. (Bkz. Şekil 1, Firma Çağrısı akışı). Bir öğrenci girişimci, “Üç günde sponsorumla eşleştim, süreç şaşırtıcı derecede hızlıydı.” diyerek modülün hızını vurgulamıştır. Bunun yanı sıra, girişim projelerine yapılan başvuruların sistem üzerinden otomatik eşleştirilmesi ve geri bildirim takibinin sağlanması kullanıcı deneyimini artıran unsurlar arasında yer almıştır. Girisimagi.org platform yapısı ile kullanıcı tipleri arasındaki ilişkiler Şekil 1’de kavramsal olarak sunulmuştur. Tablo 1’de ayrıca Proje/Üye (%) ve Sponsorluk/Üye (%) oranları verilerek etkileşim düzeyi yüzde bazında gösterilmiştir. Platforma ait ilk etkileşim verileri ise Tablo 1’de özetlenmiştir.

Girisimagi platformunun erken dönemdeki kullanım verileri Tablo 1’de özetlenmiştir. En yoğun etkileşim öğrenci girişimciler tarafından gerçekleştirilmiş olup; proje yükleme, sponsorluk başvurusu alma ve eşleşme oranları bu kullanıcı grubunda en yüksektir. Bireysel girişimciler tarafından da

aktif olarak proje oluşturulmuş, sınırlı sayıda sponsorluk eşleşmesi sağlanmıştır. Kurumsal firmalar, firma ihtiyaç paneli üzerinden çağrı oluşturmuş; bu çağrılar sistemde duyurulara dönüşerek kullanıcılarla buluşturulmuştur. Bu veriler, sistemin kullanıcılar tarafından benimsendiğini ve erken dönemde hedeflenen çoklu etkileşim modelinin işlerlik kazandığını göstermektedir

Şekil 1: *Girisimagi.org platform yapısı ve kullanıcı tipleri arasındaki etkileşim diyagramı*



IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, girişimcilik ekosistemine dijital bir ağ altyapısı kazandırmak amacıyla geliştirilen Girisimagi platformunun yapısı ve işlevleri tanıtılmıştır. Platform; bireysel girişimciler, üniversite kulüpleri, kurumsal firmalar, yatırımcılar ve mentörleri bir araya getiren çok katmanlı bir yapı ile tasarlanmıştır. Projelerin oluşturulması, destek başvurularının alınması, firma ihtiyaçlarının paylaşılması ve mentörlük eşleşmelerinin yürütülmesi gibi süreçlerin tamamı, kullanıcı dostu arayüzlerle yönetilebilecek biçimde yapılandırılmıştır.

Girisimagi.org, sadece bir içerik sunum sistemi değil; aynı zamanda girişimciler ile destek sağlayıcılar arasında aktif etkileşim kurulmasını mümkün kılan bütünsel bir dijital ağ çözümü olarak konumlandırılmıştır. Platformun teknik altyapısı, içerik denetimi ve rol tabanlı erişim modeli sayesinde güvenli, sürdürülebilir ve genişletilebilir bir yapı sunulmuştur.

Sürdürülebilir İş Modeli. Platform gelirini üç kanaldan oluşturmayı hedeflemektedir: (i) projelerin kurumsal vitrinlenmesi için Premium Hesap ücreti, (ii) alt alan sahibi üniversiteler ve firmalar için yıllık kurumsal abonelik, (iii) etkinlik ve mezun başarı öykülerinin vitrinlendiği sayfalara yönelik sponsorluk paketleri. Bu yapı, operasyonel giderleri karşılarken kullanıcılar için temel servisin ücretsiz kalmasını sağlamaktadır

Literatürde incelenen diğer platformlardan farklı olarak Girisimagi, üniversite merkezli alt alan desteği, kurumsal firmalara özel çağrı panelleri ve mentörlük sisteminin dijitalleştirilmiş haliyle dikkat çekmektedir. Bu özellikler sayesinde hem girişimcilik eğitimi desteklenmekte hem de üniversite-sanayi iş birliği dijital ortamda teşvik edilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, platformun farklı üniversitelerde aktif olarak uygulanması, kullanıcı geri bildirimlerine dayalı yeni modüllerin geliştirilmesi ve yapay zekâ destekli öneri sistemlerinin entegre edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, uluslararası girişimcilik ağlarıyla veri paylaşımı sağlanarak sistemin global düzeyde ölçeklenebilirliği araştırılacaktır.

Tablo 1: *Girisimagi.org Platformunda Kullanıcı Tiplerine Göre Etkileşim Verileri (İlk 3 Ay)*

Kullanıcı Türü	Kayıtlı Sayı	Oluşturulan proje	Eşleşen Sponsorluk	Firma Çağrısı
Öğrenci	180	92	21	-
Bireysel Girişimci	65	38	9	-
Kurumsal Firma	12	-	-	19
Mentör/Yatırımcı	15	-	-	-

Kullanıcı artışına paralel olarak yük dengeleme, veri tabanı çoğaltma ve CDN kullanımı kritik hâle gelecektir. Bu nedenle, eşzamanlı 10 000+ isteği yönetilecek auto-scaling Docker Swarm mimarisi ve read-replica MySQL kurulumu yol haritasına eklenmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Fernandes, C., Ferreira, J. J., Veiga, P. M., Kraus, S., & Dabić, M. (2022). Digital entrepreneurship platforms: A systematic literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 101979.
- [2] Ford, M., Fred, J., & Bade, A. (2025). Open innovation and its role in SMEs
- [3] StartupCommons. Erişim 20 Haziran 2025,
- [4] Etohum. Startup Turkey. Erişim 20 Haziran 2025,
- [5] AngelList. Erişim 20 Haziran 2025,
- [6] T3 Girişim Merkezi. Erişim 20 Haziran 2025
- [7] Yılmaz, A., Demir, B., & Kara, C. (2021). Dijital girişimcilik platformlarının üniversiteler arası etkileşime etkisi. *Girişimcilik ve İnovasyon Dergisi*, 11(1), 283–302.
- [8] Gül, E., & Acar, H. (2020). Öğrenci kulüplerinde dijital dönüşüm: Fırsatlar ve zorluklar. *Yükseköğretim Dergisi*, 8(2), 115–124.
- [9] Kaya, M. (2019). Üniversiteler için dijital ekosistem tasarımı. *Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, 13(3), 88–97.

Kitap Taşıma Robotlarında Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanik Performansın Değerlendirilmesi

İkranur Çırak, Yağmur Sıla Bakış, Hasan Karaduman, Barış Baysal, Yusuf Coşkun

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Günümüzde sayısal dönüşümün etkisiyle kütüphaneler, yalnızca bilgiye erişim sağlayan yerler olmaktan çıkarak çok yönlü hizmet sunan akıllı bilgi merkezlerine dönüşmektedir. Bu değişimle birlikte, hareketli robot teknolojileri kütüphane yönetim süreçlerinde önemli bir görev üstlenmeye başlamıştır. Özellikle kitapların raflara yerleştirilmesi, taşınması ve kullanıcıya ulaştırılması gibi işlerin kendi kendine yapılması, insan gücüne olan gereksinimi azaltmakta ve hizmetin niteliğini artırmaktadır. Yazında, bu tür robot düzeneklerinin görev başarısı ve yazılım gücüne ilişkin çok sayıda çalışma bulunsada, kitap taşıma sürecinde oluşan fiziksel yükler altındaki yapısal davranışları yeterince incelenmemiştir. Bu çalışmada, geliştirilen hareketli kütüphane robotunun taşıyıcı gövdesi, kitap kolu ve tutucu düzeneği gibi parçalarına, sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) durağan ve devingen incelemeler uygulanmıştır. Ayrıca biçim özelleştirme yöntemi kullanılarak yapının kütlece verimliliği artırılmış, dayanıklılığı korunmuştur. Elde edilen bulgular, robotun yapısal güvenilirliğini değerlendirmek ve uzun süreli kullanımda karşılaşılabilecek olası zayıflıkları öngörmek açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kütüphane Robotu, Yapısal Analiz, Robotik, Topoloji Optimizasyon.

I. GİRİŞ

Tarihsel süreç boyunca kütüphaneler, bilginin muhafaza edilmesi, sistematik biçimde sınıflandırılması ve sonraki nesillere aktarılması gibi temel işlevleri yerine getiren başlıca kurumlardan biri olmuştur [1]. Özellikle yazılı kültürün gelişimiyle birlikte, bu yapılar sadece bilgi saklama alanları olarak değil, aynı zamanda bilimsel, kültürel ve toplumsal ilerlemenin taşıyıcıları olarak da işlev görmüşlerdir. Günümüzde ise bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmelerin etkisiyle, kütüphaneler geleneksel rollerinin ötesine geçerek dijitalleşme odaklı, çok boyutlu hizmet sunan entegre bilgi merkezlerine evrilmektedir [2]. Bu dijital dönüşüm süreci, yalnızca elektronik kaynaklara erişimin kolaylaştırılmasıyla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda kitap kataloglama, materyal ödünç verme ve iade alma gibi işlemlerde kapsamlı otomasyon çözümlerinin entegrasyonuna da beraberinde getirmektedir. Ne var ki, tüm bu teknolojik ilerlemelere rağmen, özellikle fiziksel koleksiyonların raflara yerleştirilmesi, taşınması ve kullanıcıların aradığı materyalin fiziksel konumunun tespit edilmesi gibi operasyonel süreçler hâlâ büyük ölçüde insan emeğine dayalı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu durum, özellikle koleksiyon hacmi geniş olan ve yoğun kullanıcı sirkülasyonuna sahip büyük üniversite kütüphanelerinde ciddi düzeyde zaman kaybına, iş gücü verimsizliğine ve çeşitli operasyonel aksaklıklara yol açabilmektedir [3,4].

Bu bağlamda, mobil robot teknolojileri, kütüphane otomasyon süreçlerine kayda değer katkılar sunma potansiyeline sahip ileri düzey sistemler olarak öne çıkmaktadır. Günümüz teknolojik gelişmeleri doğrultusunda mobil robotlar; üretim hatlarından güvenlik hizmetlerine, sağlık sektöründen lojistik ve kamu hizmetlerine kadar oldukça geniş bir yelpazede yaygın biçimde konumlandırılmakta ve görev almaktadırlar [5–8]. Bu

sistemlerin sahip olduğu otonom hareket kabiliyetleri ve gelişmiş algılama-davranış entegrasyonu sayesinde, çeşitli çevresel koşullarda karmaşık görevleri yüksek hassasiyet ve verimlilikle yerine getirebildikleri görülmektedir.

Kütüphane uygulamaları özelinde değerlendirildiğinde ise, mobil robotlar insan gücüne olan bağımlılığı azaltarak; kitapların yerleştirilmesi, raflardan alınması, kullanıcıya ulaştırılması ve istenilen bölümlere yönlendirilmesi gibi temel operasyonları otonom biçimde gerçekleştirebilecek kapasitededir [9–13]. Bu tür sistemlerde genellikle entegre edilmiş görüntü işleme algoritmaları, konum belirleme sensörleri ve yapay zekâ destekli rota planlama yaklaşımları kullanılmakta, böylece fiziksel ortamla etkileşim en üst düzeye çıkarılmaktadır. Özellikle "pick-and-place" (al-ve-yerleştir) mekanizmalarıyla donatılmış mobil robotlar, kitapların tanımlanması, uygun şekilde kavranması ve önceden belirlenen raf sistemlerine hassas biçimde yerleştirilmesi süreçlerini insan müdahalesine ihtiyaç duymadan gerçekleştirebilmektedir [14–16]. Bu durum, kütüphane işleyişinde sürekliliğin sağlanması, hata oranlarının azaltılması ve hizmet kalitesinin artırılması açısından son derece önemli avantajlar sunmaktadır.

Mevcut literatürde, mobil robotların görev başarımları düzeyleri, sensör tabanlı algılama sistemlerinin doğruluk oranları ve çeşitli yazılım algoritmalarının optimizasyonuna yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen; bu robotik sistemlerin fiziksel taşıma görevleri sırasında karşılaştıkları mekanik yükler altındaki yapısal davranışları görece olarak daha az incelenmiştir. Özellikle kütüphane ortamlarında kitap gibi nispeten hafif ancak hacimsel olarak farklılık gösterebilen nesnelerin tekrar eden şekilde taşınması, robotun gövde yapısı gibi kritik bileşenlerinde zamana bağlı olarak yapısal yorulma, deformasyon veya gerilme birikimi gibi önemli mühendislik sorunlarına yol açabilmektedir. Dolayısıyla, bu tür sistemlerin sadece kontrol ve yazılım

bileşenleriyle değil, aynı zamanda fiziksel dayanıklılık ve mekanik güvenilirlik yönünden de kapsamlı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, geliştirilen mobil kütüphane robotunun yapısal bütünlüğünü değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ile gerçekleştirilecek analizler sayesinde, sistemin belirli yük koşulları altındaki deformasyon, yer değiştirme ve gerilme değerleri nicel olarak ortaya konacaktır. Ayrıca topoloji optimizasyonu ile robot bileşenlerinin kütlesi azaltılarak hem enerji verimliliği artırılabilecek hem de yapısal dayanıklılık korunacaktır. Böylece çalışma, yalnızca işlevsel bir robot tasarımı sunmakla kalmayıp, aynı zamanda kütüphane robotlarının mekanik güvenilirliğini değerlendiren özgün bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, tasarım sürecine yön verirken uzun vadeli yapısal sorunların önceden öngörülmesine de olanak tanıyacaktır.

Bu alanda yapılan önceki çalışmalar genellikle mobil kütüphane robotlarının yazılım yapısı, konumlandırma algoritmaları ya da görev planlaması gibi yönlerine odaklanmıştır. Ancak, bu sistemlerin fiziksel yükler altındaki yapısal davranışları görece olarak daha az araştırılmıştır.

Tablo 1: Bu karşılaştırma, literatürde yer alan benzer robot sistemleri ile bu çalışmanın yapısal analiz ve özgün katkı açısından ayrıştığı noktaları ortaya koymaktadır.

Çalışma	Kullanılan Yöntem	Robot Türü	Analiz Yönü	Bu Çalışmadan Farkı
Mehta & Sahu (2020)	Görsel Algılama + Yol Takibi	Kütüphane Robotu	Yazılım odaklı	Mekanik analiz yapılmamış
Yu et al. (2019)	Görüntü İşleme + QR Kod	Katlar arası hareket	Donanım entegrasyonu	Statik yüklemeye analizi yok
Wang et al. (2021)	Yol Planlama + RFID	Otonom Raf Robotu	Görev rotası doğruluğu	Yapısal değerlendirmeye yapılmamış
Fernandes et al. (2021)	Arduino Tabanlı Robotik Kol	Kitap Alma Robotu	Donanımsal prototipleme	Yapısal optimizasyon yapılmamış
Chalmers & Phipps (2018)	Tam otonom sistem + Kamera	Kütüphane Robotu	Otonomi düzeyi	Malzeme seçimi ve yapısal yüklemeye analizi yok
Bu Çalışma	FEA + Topoloji Optimizasyonu	Kütüphane Robotu	Statik ve yapısal analiz	Yapısal yüklemeye altında dayanım değerlendirilmesinin mevcut

II. TASARIM

Tasarım süreci, SolidWorks yazılımı kullanılarak yürütülmüş ve üç boyutlu CAD modeller aracılığıyla prototipin sanal montajı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, vidasız montaj imkânı sunan yapboz tipi modüler bir gövde tasarlanmış; ancak bu yapının uzun vadeli dayanım açısından yetersiz olabileceği öngörülmüştür. Bu nedenle tasarım, tek parça gövde formuna dönüştürülerek yapısal bütünlük artırılmış, montaj süreci sadeleştirilmiş ve üretim sonrası hata riski azaltılmıştır. Robotun tasarımı Şekil 1’de verilmiştir.



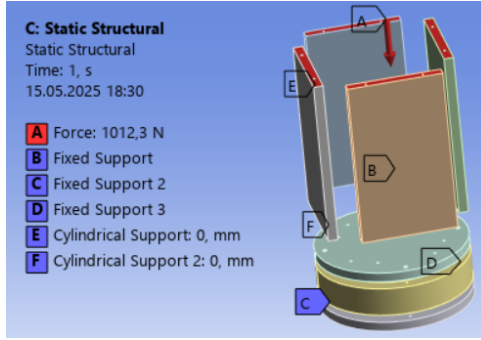
Şekil 1: SolidWorks’te tasarlanan model

III. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

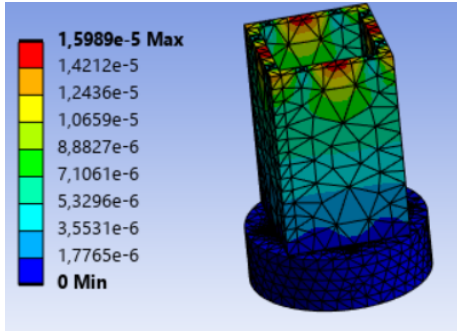
Tasarımı yapılan robot sistemine ilk olarak ANSYS yazılımı kullanılarak statik analiz uygulanmıştır. Analiz sürecinde, gövde üzerindeki dikdörtgen parçaların delik bölgelerine Cylindrical Support tanımlanarak bu noktaların sabitlenmiş ve taşıyıcı elemanlar olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, Fixed Support koşulları; gövdedeki dikdörtgenlerin birbirine temas eden yüzeylerinde ve üç parçalı disk yapısının alt ve üst yüzeylerinde ayrı sekmeler halinde tanımlanmıştır. Uygulanan Force yükleri ise, gövde üzerine yerleştirilmesi planlanan ekran plakasının oluşturacağı kuvveti temsil etmektedir. Tasarımın bir kısmına yapılmış olan analizin sınır koşulları Şekil 2’de verilmiştir. Sınır koşullarının verilmesinden sonra toplam deformasyon gerilim ve gerinim değerleri incelenmiştir.

Tablo 2: Bu çalışmada analiz edilen pleksi malzemesine ait yoğunluk, dayanım ve termal iletkenlik gibi temel fiziksel ve mekanik özellikler.

No	Özellik (Property)	Değer (Value)	Birim (Unit)
1	Density (Yoğunluk)	1,18	g/cm ³
2	Melting Temperature (Ergime Sıcaklığı)	160	°C
3	Tensile Yield Strength (Çekme Akma Dayanımı)	3,2	GPa
4	Compressive Yield Strength (Basma Akma Dayanımı)	120	MPa
5	Tensile Ultimate Strength (Çekme Mukavemeti)	71	MPa
6	Isotropic Thermal Conductivity (İzotropik Termal İletkenlik)	0,19	W/(m·K)



Şekil 2: Tasarıma uygulanmış sınır koşulları
Toplam deformasyon değeri ise Şekil 3'te verilmiştir.



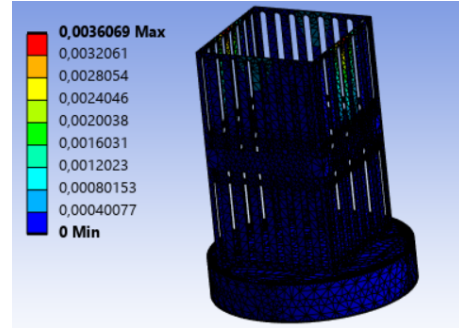
Şekil 3: Toplam deformasyon miktarı

Yapısal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

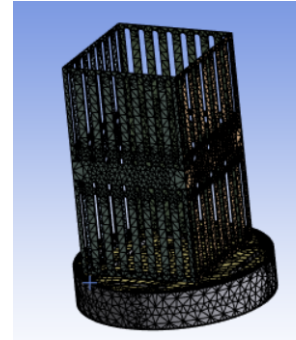
Tablo 3: Uygulanan sınır şartlarına göre sistemin verdiği sonuçlar

Deformasyon (mm)	Gerilim (Mpa)	Gerinim (mm)
1,5989 e-5	7,7598 e-7	0,13303

Çalışmada, robotun kütlesini azaltırken yapısal dayanımını korumak amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Bu süreçte, yapısal olarak kritik olmayan bölgeler sistemden çıkarılmış ve elde edilen yeni model üzerinde yeniden statik analiz gerçekleştirilerek mukavemet değerleri doğrulanmıştır. Topoloji optimizasyonu öncesinde 208,01 kg kütleye sahip olan robot gövdesi, yapılan yapısal sadeleştirme süreci sonucunda 15,2 kg'a indirilmiş ve böylece yaklaşık %92,7 oranında malzeme azaltımı sağlanmıştır. Optimizasyon sonrası elde edilen model üzerinde yapılan statik analiz sonuçlarına göre, toplam şekil değiştirme (total deformation) 0,0036069 mm, gerinim $4,3272 \times 10^{-6}$ ve gerilme 0,80643 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, optimize edilen yapının hem hafiflik hem de yapısal dayanıklılık açısından etkin bir performans sergilediğini göstermektedir. Optimizasyon sonrası oluşan parçanın toplam deformasyon değeri Şekil 4'te, detaylı mesh görünümü Şekil 5'te verilmiştir.



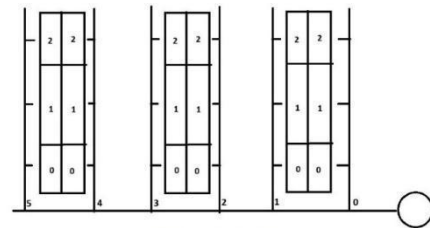
Şekil 4: Optimizasyon sonrası toplam deformasyon miktarı



Şekil 5: Optimizasyon sonrası detaylı mesh görünümü

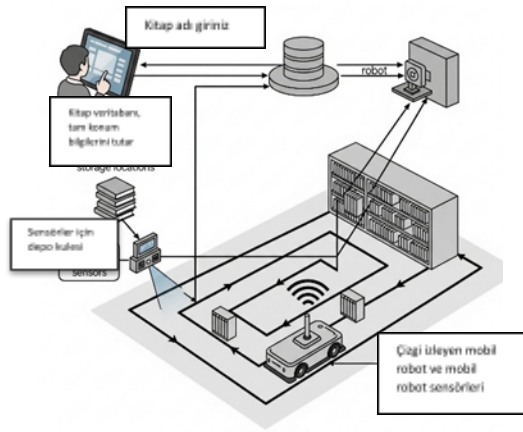
IV. ALGORİTMA MANTIĞI

Geliştirilen mobil robot, çizgi izleme ve yön tayini görevlerini kızılötesi sensörler ve PID kontrol algoritması ile gerçekleştirmektedir. Sistem üzerinde yer alan 6 kızılötesi sensörden 4'ü çizgi takibi için, 2'si ise yol ayrımı ve yön tespiti amacıyla kullanılmaktadır. PID kontrolü sayesinde robot, çizgi üzerindeki sapmaları hassas şekilde algılayarak kararlı bir hareket sağlar. Çizgi izleme mantığı ile oluşturulan kütüphane modelinin görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.



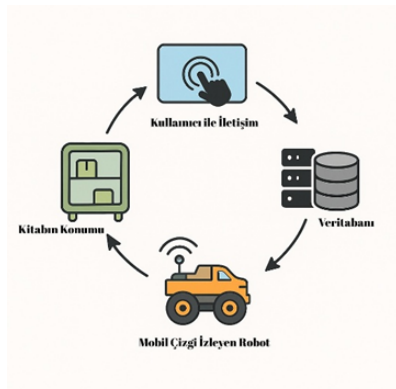
Şekil 6: Çizgi izleme mantığı ile oluşturulan kütüphane modeli

Robot, hedef konum bilgilerini bir veri tabanı üzerinden alır; bu bilgiler hedef sıra ve kitaplık konumlarını içermektedir. Robot, mevcut konumunu iki ayrı değişkenle izler: sıra konumu ve kitaplık konumu. Çizgi izleme sırasında, en sağ veya en sol sensörden sinyal alındığında, mevcut sıra konumu hedef veri ile karşılaştırılır. Uyuşma sağlanırsa robot yön değiştirir; sağlanmazsa ilerlemeye devam eder. Robotun iletişim ağını anlatan figür Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 7: Kullanıcı tarafından Türkçeleştirilmiş, ChatGPT destekli AI tabanlı kütüphane robot sistemi şeması.

Hedef sıraya ulaşıldığında, benzer mantık kitaplık konumu için uygulanır. Robot, hedef kitaplık önüne ulaştığında kullanıcıyı bilgilendirir. Kullanıcı yeni bir kitap talebinde bulunursa, robot başlangıç çizgisine dönerek süreci yeni hedef verilerle tekrarlar. Talep yoksa, robot istasyona geri dönerek görevini sonlandırır. Kullanıcı ve robot geri bildirimin Şekil 7’de gösterildiği gibidir.



Şekil 8: Robotun iletişim ve geri bildirimi

V. KAYNAKLAR

- [1] Salmon, F., & Smart, C. A. (2012). The role of the academic library in facilitating scholarly communication. *Caribbean Quarterly*, 58(2-3), 67-78.
- [2] Ozeer, A., Sungkur, Y., & Nagowah, S. D. (2019, December). Turning a traditional library into a smart library. In 2019 international conference on computational intelligence and knowledge economy (ICCIKE) (pp. 352-358). IEEE.
- [3] Iglesias, E. (Ed.). (2013). *Robots in Academic Libraries: Advancements in Library Automation*. IGI Global.
- [4] Liabor, V. G. R. (2023). Enhancing library services through digital cataloging techniques. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, 3(1).
- [5] Schwaiger, S., Muster, L., Scherl, A., Trivisonne, P., Wöber, W., & Thalhammer, S. (2024). Towards full autonomy in mobile robot navigation and manipulation.

- e+ i Elektrotechnik und Informationstechnik, 141(6), 400-410.
- [6] Keith, R., & La, H. M. (2024). Review of Autonomous Mobile Robots for the Warehouse Environment. *arXiv preprint arXiv:2406.08333*.
- [7] Heikkilä, T., Pakkala, D., Seppälä, T., Kotaniemi, J., Pääkkönen, P., Saukkoriipi, J., & Niskanen, I. (2022). Manufacturing operations as services by robots with skills. *Open Engineering*, 12(1), 627-639.
- [8] Mehta, R., & Sahu, A. (2020, February). Autonomous robot for inventory management in libraries. In 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS) (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Yu, H., Li, L., Chen, J., Wang, Y., Wu, Y., Li, M., ... & Arai, T. (2019, August). Mobile robot capable of crossing floors for library management. In 2019 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA) (pp. 2540-2545). IEEE.
- [10] Chalmers, S., & Phipps, W. (2018). The development of an Autonomous Library Robot. *Advances in Service Robotics*, Opentech.
- [11] Liau, Y. C. (2017). Transforming library operation with robotics.
- [12] Mehta, R., & Sahu, A. (2020, February). Autonomous robot for inventory management in libraries. In 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS) (pp. 1-6). IEEE.

PV Destekli 7.4 kW Ev Tipi Hibrit Elektrikli Araç Şarj İstasyonunun Elektronik Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

Mehmet Salih Eyice¹, Erkan Dursun²

¹*Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye*

²*Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye*

ÖZET

Günümüzde çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olarak öne çıkan elektrikli araçların yaygınlaşmasının sonucu elektrikli araç şarj sistemlerinin önemi büyük ölçüde artmıştır. Elektrikli araç şarj istasyonlarında alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) kullanılmaktadır. AA kullanan şarj istasyonları yavaş şarj olarak tanımlanırken DA kullanan şarj istasyonları hızlı şarj olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada tamamen şebeke bağlantılı endüstriyel DA şarj istasyonlarının aksine fotovoltaik (PV) destekli AA şarj istasyonu elektronik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şarj istasyonu tasarımında dikkat edilmesi gereken parametreler anahtarlama sistemi, araç ile şarj durumu haberleşmesi ve güç beslemeleridir. Çalışma kapsamında 7,4 kW gücünde AA şarj istasyonunun elektronik devre tasarımı kısmında kontrol ve güç kartı modülleri tasarlanmıştır. Şarj istasyonu için yazılım algoritması geliştirilerek hem donanım hem yazılım açısından yerli bir şarj istasyonu tasarlanması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şarj, Elektrikli Araç, Kontrol, Güç, Alternatif Akım.

I. GİRİŞ

Günümüzde otomobiller insan hayatını önemli ölçüde kolaylaştıran araçlardır. Özellikle büyük şehirlerde ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak ve bireysel hareket özgürlüğünü artırmak için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu ihtiyacı karşılamak için zaman içinde buharlı, benzinli, dizel ve elektrikli araçlar ortaya çıkmıştır. Elektrikli araçların geleneksel içten yanmalı araçlara kıyasla en önemli avantajı enerji verimliliğidir. EA'lar (Elektrikli araç) aracı hareket ettirmek için bataryadan ve rejeneratif frenlemeden gelen enerjinin yaklaşık %87-%91'ini kullanır. Benzinli araçlar, benzinden gelen enerjinin yalnızca yaklaşık %16-25'ini harekete dönüştürmektedir [1]. 2020 yılında küçük bir benzinli SUV için üretim sürecinden geri dönüşüm sürecine kadar sera gazı (GHG) emisyonlarının mil başına 429 gram karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) olduğu tahmin edilirken, 300 mil menzile sahip aynı boyuttaki elektrikli araç %48 daha az GHG emisyonuna sahip olduğu belirtilmiştir [2]. 2025 yılı kayıtlarına göre bir elektrikli aracın benzer bir içten yanmalı araca göre %46 daha az sera gazı emisyonu ürettiği görülmektedir. 2035 yılında bir elektrikli aracın 2025 de bir içten yanmalı araca göre %76 daha az sera gazı emisyonu üreteceği öngörülmektedir [3].

Bu avantajlarının yanı sıra elektrikli araçların kullanım sonrası şarj edilmeleri gerekmektedir. Ülkemizde her geçen gün artan EA'lar ve bu araçların şarj sorununa çözüm olarak giderek sayısı artan şarj istasyonları kurulmaktadır. 20 Eylül 2023 EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) verilerine göre Türkiye'de toplam 8 bin 861 şarj noktası bulunmaktadır [4].

Fakat ülkemizde henüz yeteri kadar şarj istasyonunun kurulu olmaması ve ülkenin her bölgesinde şarj istasyonuna ulaşımın sağlanamaması gibi durumlarla karşılaşabilmektedir. Özellikle uzun mesafeli yolculuklarda elektrikli araç kullanıcıları şarj sorunu ile karşılaşmaktadır. Ancak bu alanda yapılan çalışmalar sonucu güneş enerjisi ve şebeke elektrikli ile hibrit bir sistem

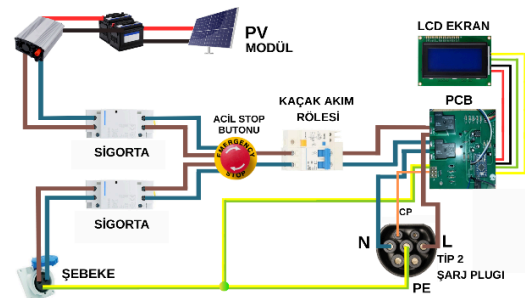
tasarlanarak elektrikli araçların şarj edilebileceği öne sürülmüştür [5].

Ülkemizde her bölgenin yüksek güneş enerji potansiyeli olmadığı gibi bazı bölgelerde şebeke sistemleri de yetersiz kalmaktadır. Bu durumda her iki sistemin hibrit bir şekilde çalıştığı, şebekeye bağlı PV (fotovoltaik) destekli elektrikli araç şarj istasyonları bulunmaktadır. Şekil 1' de şebeke bağlantılı ve PV destekli şarj istasyonu örneği gösterilmiştir [6].



Şekil 7: PV destekli hibrit şarj istasyonu örneği [6]

Şarj süresince PV modül sisteminden veya şebekeden çekilen şarj akımı ve gerilimi görüntülenebilecektir. PV destekli hibrit şarj istasyonu elektronik sistem tasarımı elektrik hat şeması şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 8: PV destekli hibrit şarj istasyonu elektrik hat şeması

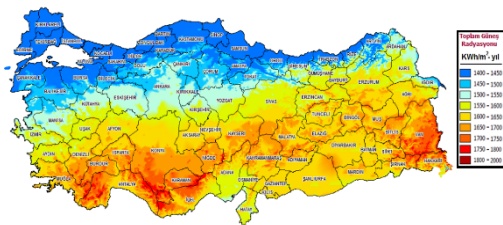
Bu çalışma ile PV destekli AA şarj istasyonlarının elektronik ve yazılım altyapısının yerli olarak geliştirildiği özgün bir sistem sunulmuştur.

II. YÖNTEM

Sistemin tasarım aşamaları PV sistem tasarımı, elektronik sistem tasarımı ve yazılım tasarımı olmak üzere toplam 3 farklı bölümden oluşmaktadır.

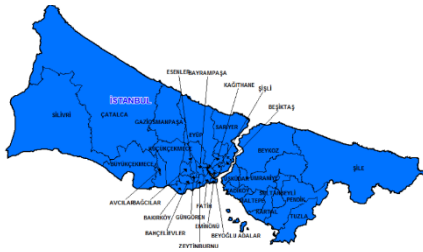
II.1. PV Sistem Tasarımı

PV sistem tasarımı Türkiye'nin kuzey batısında İstanbul ili Anadolu yakası Maltepe ilçesinde 29.135302 enlem ve 40.958159 boylam konumunda yer alan Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi için yapılmıştır. İstanbul ili güneş enerjisi potansiyeli bakımında verimli bir alan değildir. İstanbul için şekil 3'te gösterilen Türkiye güneş enerjisi radyasyon cetveli incelendiğinde İstanbul'un yıllık güneş radyasyonu ve güneş enerji potansiyeli bakımından düşük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırladığı 2022 tarihli Türkiye'nin güneş enerji potansiyeli isimli rapora göre İstanbul'un günlük ortalama güneşlenme süresi 6,5 saat, günlük ortalama güneş enerjisi de 3,638 kWh/m² gün şeklinde belirlenmiştir [7].



Şekil 3: Türkiye güneş enerjisi cetveli (Gepa, 2022)

Şekil 4'te İstanbul güneş enerjisi radyasyon cetveli gösterilmiştir.



Şekil 4: İstanbul güneş enerjisi cetveli (Gepa,2022)

Şarj istasyonunun kurulacağı İstanbul Anadolu yakası Maltepe ilçesinde 29.135302 enlem ve 40.958159 boylam konumunda yer alan Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bölgedeki güneş radyasyonu değerleri tablo 1’de verilmiştir. İstanbul Maltepe’de 29.135302 enlem ve 40.958159 boylam koordinatlarında PV modül dikey ve 31° uygun açıyla yerleştirilmelidir.

Tablo 1: İstanbul solar radyasyon değerleri (Gsa, 2024).

Aylar	Solar radyasyon değeri (kWh/m ² -ay)
-------	---

Ocak	56,8 kWh/m ²
Şubat	67,1 kWh/m ²
Mart	97,4 kWh/m ²
Nisan	121,8 kWh/m ²
Mayıs	159,8 kWh/m ²
Haziran	186,3 kWh/m ²
Temmuz	206,6 kWh/m ²
Ağustos	173,2 kWh/m ²
Eylül	127,5 kWh/m ²
Ekim	89,8 kWh/m ²
Kasım	68,8 kWh/m ²
Aralık	52,2 kWh/m ²

Bölgeye yerleştirilen PV modül üzerine gelen güneş radyasyon değeri yıllık toplam 1,407 MWh/m² olmaktadır. Aylık solar radyasyon değerleri ise ay içerisinde günlük olarak m² ye düşen ortalama güneş enerjisi miktarıdır [8]. İstanbul'da ortalama 3.6 kWh/m²/gün güneşlenme süresi ve %15 PV sistem verimi dikkate alındığında, 7.4 kWh günlük enerji ihtiyacını karşılamak için yaklaşık 13.7 m² panel alanı gerekmektedir. Bu doğrultuda her biri 350 W gücünde ve 1.6 m² alana sahip yaklaşık 9–10 adet PV panel yeterli olacaktır.

Bu çalışmada PV destekli hibrit şarj istasyonu PV sistem tasarımı ve hesaplamaları yapılmış olup şekil 5'te gösterildiği gibi hibrit şarj istasyonunun şebeke beslemeli güç sistemi ve elektronik kontrolcü bölümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5: Şebeke beslemeli şarj istasyonu elektrik hat şeması

Sistemde 7.4 kW güç seviyesi, tek fazlı 230V ve 32A akım sınırlamasıyla Tip 2 şarj sistemleri için optimum değerdir. Bu seçim, konut tipi kullanım ve regülasyonlar için uygundur.

II.2 Elektronik Sistem Tasarımı

Elektronik devre tasarımı çalışmalarında güç katı ve kontrol katı olmak üzere toplamda 2 farklı kat olarak şarj istasyonu tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Şarj istasyonunun genel görünümü Şekil 6’da verilmiştir.



Sekil 6: Gerçekleştirilen şarj istasyonunun genel görünümü

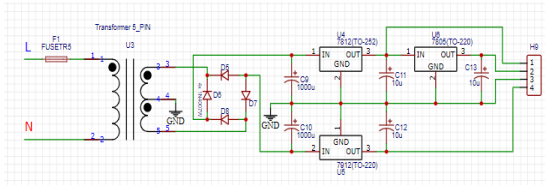
PV destekli hibrit şarj istasyonu kontrol katının genel özellikleri tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Hibrit şarj istasyonunun genel özellikleri.

Kontrol katı giriş voltajı	+12V _{DC} , +5V _{DC} ve -12V _{DC}
Güç katı giriş voltajı	185-240 V _{AC}
Güç katı çıkış voltajı	+12V _{DC} , +5V _{DC} ve -12V _{DC}
Maksimum güç	7.4 kW
Dijital çıkışlar	5 adet 0-5 V
Analog girişler	3 Adet +-5V
Haberleşme arayüzü	I2C
Kullanıcı arayüzü	2x16 LCD Ekran

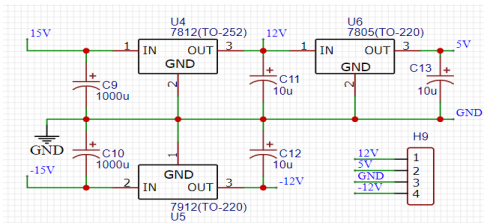
II.2.1. Güç Katı Tasarımı

Güç katında voltaj düşürücü trafo tam köprü doğrultucu devre, 12V, 5V ve -12V doğru akım düşürücü güç kaynağı devreleri bulunmaktadır. Sürücünün güç girişinde 2x15VAC trafo bulunmaktadır. Voltaj düşürücü trafo olarak E6021007 2x15V trafo modülü kullanılmıştır. 2x15V trafo modülü, ±12V ve +5V çıkış regülatörlerinin kararlı çalışmasını sağlayacak DC voltajı sunması açısından seçilmiştir. 1N4007 diyotları ile doğrultma yapıp DA filtre kondansatörü olarak 2 adet 1000 µF kondansatör kullanılmıştır. Bu sayede DA gerilim girişine filtreleme işlemi yapılmaktadır. Tam köprü doğrultucu devre şeması Şekil 7’de verilmiştir.



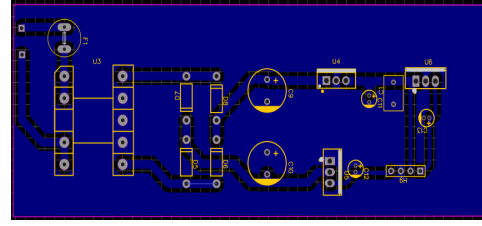
Şekil 7: Tam köprü doğrultucu devre şeması

Devrede doğru akım düşürücü LM7912, LM7812 ve LM7805 regülatör entegreleri kullanılmaktadır. LM7912, LM7812 ve LM7805 entegreleri güç kaynağı devrelerinde sıklıkla kullanılan regülatör entegreleridir. Doğru akım düşürücü regülatör entegreleri devre şeması Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8: Doğru akım düşürücü regülatör devresi

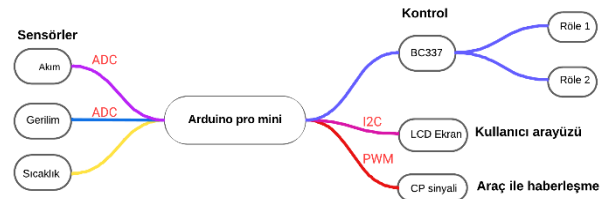
Şarj istasyonunun güç devresi girişinde aşırı akıma karşı koruma sağlaması amacıyla 1 adet TR5 2A sigorta bulunmaktadır. Güç katı devresi EasyEDA ortamında 100x50 mm boyutlarında tek taraflı PCB olarak tasarlanmıştır. Güç katı PCB tasarımı Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9: Güç katı PCB tasarımı

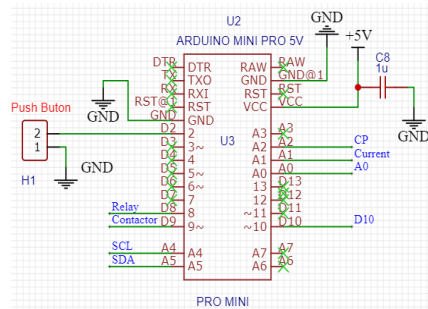
II.2.2. Kontrol Katı Tasarımı

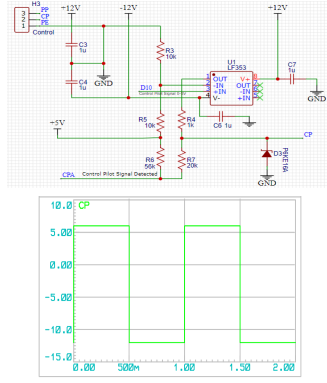
Kontrol katı mikrodenetleyici, opamp, röle, LCD ekran ve sensör devrelerinden meydana gelmektedir. Mikrodenetleyici olarak Arduino pro mini kullanılmıştır. LCD ekran ile haberleşme arayüzü için I2C birimi, araç ile haberleşme sinyali CP için PWM kullanılmıştır. Şekil 10’da kontrol katının blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 30: Kontrol katı blok diyagramı

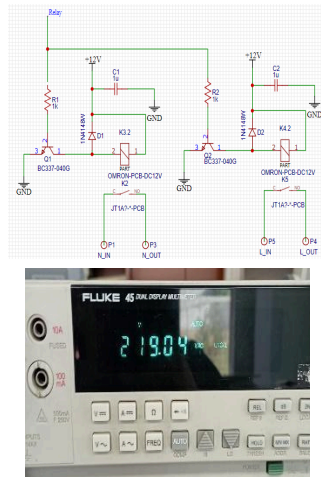
Kontrol katında yer alan Arduino pro mini mikrodenetleyicisinin devre şeması Şekil 11’de verilmiştir.





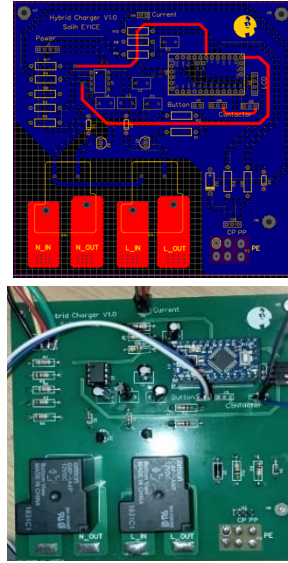
Şekil 12: CP sinyali şematik tasarımı ve şarj durumu grafiği

Kontrol katında yer alan bir diğer eleman olan 12V bobin gerilimine sahip 40A 220V röledir. 1. röleye şebeke ile şarj kablosunun nötr uçları bağlanırken 2. röleye faz uçları bağlanmıştır. Röle 12V ile çalıştığından Arduino ile direkt olarak tetiklenememektedir. Bu nedenle BC337 BJT (Bipolar Junction Transistor) transistörü bağlanarak röle aktif edilmiştir. Şekil 13'te röle ve transistör bağlantısı ve röle aktif olduktan sonra rölelerin N_out ve L_out pinleri arası gerilim düşümü verilmiştir.



Şekil 13: 12V röle bağlantı şeması ve gerilim düşümü

Kontrol katı devresi EasyEDA ortamında 120x120 mm boyutlarında çift taraflı PCB olarak tasarlanmıştır. Kontrol katı PCB tasarımı şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14: Kontrol katı PCB tasarımı

II.3 Yazılım Sistemi Tasarımı

Geliştirilen şarj istasyonu kapsamında Arduino pro mini mikrodenetleyici üzerinde yazılım geliştirme çalışmaları yapılmış ve yazılım geliştirme çalışmaları sonucunda şarj ünitesinin testleri gerçekleştirilmiştir. Şarj istasyonu yazılımı “kolayca taşınabilme, yeniden kullanılabilme, okunabilme” gibi belirli kurallar çerçevesinde alt modüller haline getirilerek geliştirilmiştir. Yazılım konfigürasyonundaki alt modülleri aşağıdaki gibidir:

- Kullanıcı arayüzü: Araç şarjı sırasında aracın anlık olarak çektiği akım, gerilimi ve buna bağlı çekilen güç parametrelerinin kullanıcı arayüz modülünde kullanım ihtiyacı göz önünde bulundurulmuştur.
- Veri toplama modülü: Arduino pro mini akım, gerilim ve sıcaklık sensörleri analog SCT-013 akım sensöründen ölçülen 0-30A AA akım değerini 0-1V arasında analog sinyal değeri olarak algılamakta ve ADC (Analog Dijital Çevirime) işlemi yapar. Bu sayede sistemin şarj akımının ölçülmesi sağlanır. Bir diğer ADC pini kullanılarak AA geriliminin ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca CP sinyalinin gerilim değeri ölçülerek aracın şarj durumu ve şarj cihazının bağlantı şeklini kontrol edilmektedir.
- CP kontrol modülü: Sistemin kontrol algoritmasında 1 kHz frekansına sahip CP PWM sinyali kullanılmıştır. CP sinyalinin farklı gerilim seviyeleri aracın farklı şarj durumlarını temsil etmektedir. +12V araç bağlı değilken, +9V araç bağlı ama şarj edilmeyorken, +6V araç şarj ediliyorken ve +3V hata durumu için kullanılmaktadır. Şekil 15'te CP sinyalinin durumlarına ilişkin kod bloğu verilmiştir.

```
byte Read_Pilot_Voltage()
{
    static int Fault_Count = 0;
    static int Previous_Value = _12_VOLTS;

    // Here we take the Pilot voltages and classify them into states
    if((Pilot_Low_ADC > NEG_12V_MIN and Pilot_Low_ADC < NEG_12V_MAX) or OCR18 == 0) {
        if(Pilot_High_ADC > POS_12V_MIN and Pilot_High_ADC < POS_12V_MAX) {
            Previous_Value = _12_VOLTS; Fault_Count = 0;
            return(_12_VOLTS);
        }
        else if(Pilot_High_ADC > POS_9V_MIN and Pilot_High_ADC < POS_9V_MAX) {
            Previous_Value = _9_VOLTS; Fault_Count = 0;
            return(_9_VOLTS);
        }
        else if(Pilot_High_ADC > POS_6V_MIN and Pilot_High_ADC < POS_6V_MAX) {
            Previous_Value = _6_VOLTS; Fault_Count = 0;
            return(_6_VOLTS);
        }
        else if(Pilot_High_ADC > POS_3V_MIN and Pilot_High_ADC < POS_3V_MAX) {
            Previous_Value = _3_VOLTS; Fault_Count = 0;
            return(_3_VOLTS);
        }
    }
}
```

Şekil 15: CP sinyali kaynak kod parçası

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada PV destekli hibrit şarj istasyonu elektronik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmalarına ek olarak LT Spice XVII ortamında sistemin modellemesi yapılmıştır. Tablo 3'te simülasyon değerleri ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Tablo 2: Simülasyon ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Ölçüm sonucu	Simülasyon değeri	Ölçüm sonucu	Simülasyon değeri
+12.042V _{DC}	+12V _{DC}	+9.052V _{DC}	+9V _{DC}
-11.965V _{DC}	-12V _{DC}	+6.087V _{DC}	+6V _{DC}
+5.013V _{DC}	+5V _{DC}	+2.921V _{DC}	+3V _{DC}

Yapılan çalışmalar ile ölçüm sonucu elde edilen test verileri karşılaştırılmıştır ve sonuçların doğruluk oranının %98,83 ile %99,74 arasında olduğu görülmüştür.

Çalışma süresince AA/DA dönüştürücü devreler, haberleşme sistemleri, şarj kontrol algoritmaları, güç elektroniği donanımı ve gömülü yazılım geliştirme alanlarında önemli teknik kazanımlar elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda; uzaktan izleme ve kontrol için mobil uygulama entegrasyonu, kullanıcı tanımlı şarj senaryoları ve farklı güç seviyelerinde modüler tasarımlar gibi eklemelerle sistemin daha esnek ve ölçeklenebilir hale getirilmesi hedeflenmektedir.

IV. KAYNAKLAR

- [1] U.S. Environmental Protection Agency. (2025, January). Electric Vehicle Myths. www.epa.gov/greenvehicles/electric-vehicle-myths
- [2] U.S. Department of Energy. (2023, August 14). FOTW #1303: From cradle to grave, electric vehicles have fewer Vehicle Technologies Office. www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1303-august-14-2023-cradle-grave-electric-vehicles-have-fewer
- [3] U.S. Department of Energy. (n.d.). RD-GREET life-cycle assessment model. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. www.energy.gov/eere/rd-greet-life-cycle-assessment-model
- [4] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Türkiye'nin Şarj Ağı Hızla Genişliyor, (10.2023) www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/213147/turkiyenin-sari-agi-hizla-genisliyor,
- [5] Öter, A. & Baltacı, F. (2022). Elektrikli Araçlar İçin Akıllı Hibrit Şarj İstasyonu Örneği . Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 9 (1) , 160-175 . DOI: 10.35193/bseufbd.1002649
- [6] Gürbüz, H. (2021). Yerli Elektrikli Aracın Elektrik Sarfiyatını Güneş ve Rüzgâr Enerjisi ile Karşılama Potansiyeli . Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi , (25) , 58-69 . DOI: 10.31590/ejosat.896937
- [7] GEPA, “Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası”, (02.2024) , gepa.enerji.gov.tr/
- [8] GSA, “Global Solar Atlas”, (02.2024) globalsolaratlas.info/map?c=40.956463,29.136317,16&s=40.958667,29.135489&m=site

- [9] Bahrami, Ali. (2020). EV Charging Definitions, Modes, Levels, Communication Protocols and Applied Standards. 10.13140/RG.2.2.15844.53123/11.

Bobinli Silah Tasarımı ve Uygulaması: Elektromanyetik Fırlatma Sisteminde Yönelik Bir Yaklaşım

Zeynep Ceyda Aydemir, Pelin Kırdan, Ercan Gönüldeş

Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

ÖZET

Elektromanyetik kuvvetlerin kullanıldığı fırlatma sistemleri, geleneksel kimyasal tabanlı yöntemlere kıyasla mermileri çok daha yüksek hızlarla fırlatabilme potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda yürütülen çalışmada, görüntü işleme algoritmaları (nesne algılama, hedef takibi) ve sensör teknolojileri ile entegre edilmiş, hem manuel hem de otomatik hedef takibi yapabilen bir elektromanyetik fırlatıcı sistemi geliştirilmiştir. Önerilen yapı, atış hızında %20'ye varan artış ve hedef doğruluğunda %30'a kadar iyileşme sağlayabilmektedir. Literatürde, elektromanyetik fırlatma sistemlerine yönelik otomatik hedef takip ve ateşleme mekanizmalarına dair sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla geliştirilen algoritmalar, nesne algılama ve hedef takibi süreçlerini iyileştirmeye yönelik olup, aynı zamanda makine öğrenmesi ve yapay zeka tabanlı uygulamalarda da kullanılabilecek niteliktedir. Elde edilen bulguların, gelecekteki araştırmalar için temel teşkil etmesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Fırlatıcılar, Hedef Takibi, Görüntü İşleme, Makine Öğrenmesi, Yapay Zeka.

I. GİRİŞ

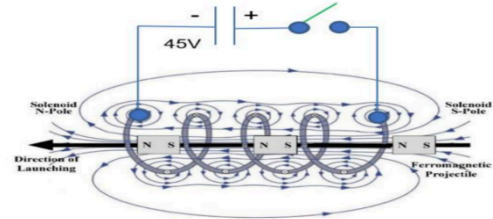
Barutlu silahlar, uzun yıllardır kullanılan klasik ateşli silahlar olsalar da önemli birkaç olumsuz yanları bulunmaktadır. İlk olarak barutlu silahlar, yanma reaksiyonu sonucu oluşan yüksek sıcaklık ve gaz basıncı ile çalışırlar. Bu da çevreye zararlı gaz emisyonlarına yol açar. Ayrıca barut kullanımı sonucu silahların iç mekanizmaları da zamanla aşınır, bu da bakım maliyetlerini artırır ve silahın ömrünü kısaltır. Patlama sesinin yüksek olması ise operasyon sırasında hem askerler hem de sivil alanlar için tehlikeli bir dezavantaj oluşturmaktadır [1].

Elektromanyetik fırlatma sistemlerinde, klasik ateşli silahlarda olduğu gibi barut ya da kimyasal patlayıcılar yerine manyetik alan kullanılarak mermi ateşlenmektedir. Bu sayede patlama ve yanma riskleri ortadan kalkmakta, cephan taşıma ve depolama daha güvenli hâle gelmektedir. Isıyı manyetik alanlar aracılığıyla yaydığı için namlu aşınması ve ısınma sorunları da minimuma indirilebilmektedir. Ayrıca mermiyi çok yüksek hızlara ulaştırabildiğinden, uzun menzilde isabet oranı ve delici gücü artmaktadır. Görüntü işleme destekli bu sistemlerin sağladığı enerji verimliliği ve yüksek atış hızları, elektromanyetik fırlatıcıların mühendislik alanında yeni araştırmalara zemin hazırlamasını mümkün kılmaktadır [2]. Bobinli elektromanyetik fırlatıcının verimi, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesiyle hesaplanır.

m merminin kütlesi, V merminin çıkış hızı, C kondansatör kapasitesi, V_i giriş ve V_f çıkış voltajı olmak üzere, bu verimin hesabı denklem (1)'de verilmiştir:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\frac{1}{2}CV_i^2 - \frac{1}{2}CV_f^2} \quad (1)$$

Bobinli elektromanyetik fırlatıcının çalışma mekanizması şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Bobinli fırlatıcının çalışma mekanizması [3]

Mevcut çalışmalar, bobinli elektromanyetik fırlatma sistemlerinin genellikle basit mekanik hedefleme yöntemleri ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Örneğin A. Harmankaya ve S. Çelik'in (2013) Elektromanyetik Fırlatıcılar çalışmasında şebekeden alınan 220V, 12V'a dönüştürülerek kullanılmıştır. Bu çalışmada elektromanyetik fırlatıcıların çeşitlerinden olan birden fazla sargının senkronize kullanılarak oluşturulan modeli gerçekleştirilmiştir. Bu sistem fazla bobine sahip olmasının avantajı ile beraber bobinlerinin belirli sıra ve zamanlamayla enerjilendirilmesinin zorluğu ve hassasiyetinin dezavantajını taşımaktadır[3].

Daha önce yapılan çalışmalarda hedef seçimi ve isabet oranı kullanan kişiye bağlı olarak değişkenlik gösterdiği için hata payı yüksektir. Önerdiğimiz araştırma projesinde, literatürdeki bu boşlukları doldurarak elektromanyetik fırlatıcı sistemlerine sensör ve görüntü işleme teknolojilerinin entegrasyonu ile hedef doğruluğunu artırmak ve atış hızını geliştirmek amaçlanmaktadır.

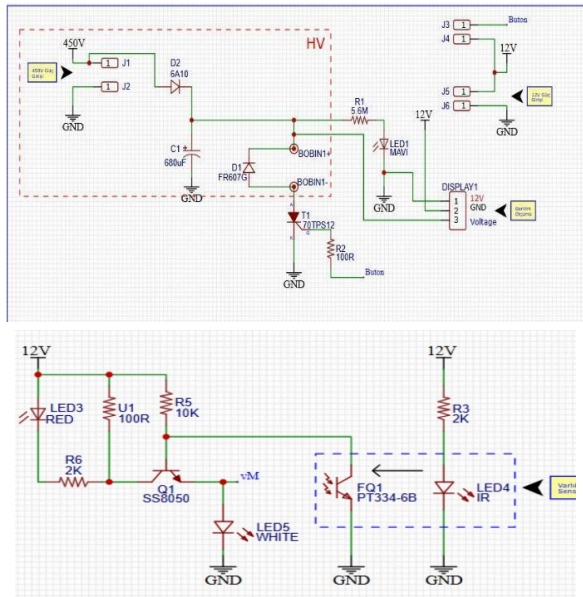
II. YÖNTEM

Projenin kapsamı, elektromanyetik tabanlı fırlatıcının kurgusal simülasyonların ve prototiplerin yanında görüntü işleme algoritması ile birlikte hedef takibini ve doğruluğunu içermektedir. Güvenlik önlemlerini artırma ve otomatikleştirilmiş bir kontrol mekanizması geliştirme araştırmanın temel hedefleri arasındadır. Çalışma, elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinin mevcut mekanik

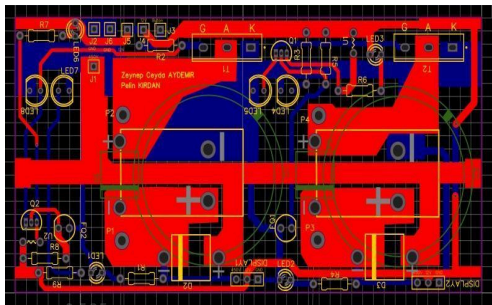
hedefleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek hassasiyet ve verimlilik elde etmeye yönelik çözümler sunacaktır.

II.1. Elektronik Tasarımın Geliştirilmesi

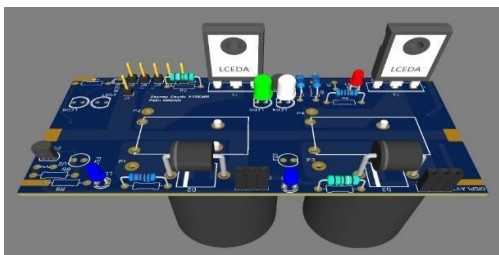
Elektronik tasarımın geliştirilmesi sürecinde ilk olarak sistemde yer alan çıkış kapasitörlerinin şarj olması için gereken 400V DC (Doğru Akım) gerilimin elde edilmesidir. Bu işlem bir PCB kartı üzerinde yapılacaktır. Sistemde yer alan 12V DC bataryadan 400V DC gerilim elde edilmesi için hazır DC-DC ayarlanabilir yüksek voltaj modülü, 40TPS12 tristör, 8050S BJT transistör ve pasif devre elemanları kullanılmıştır. Şekil 2'de PCB'nin devre şeması verilmiştir. Şekil 3'te sistemin PCB tasarımı gösterilmiştir. Şekil 4'te ise tasarlanan PCB kartının 3D görünümü gösterilmektedir.



Şekil 2: PCB'nin devre şeması



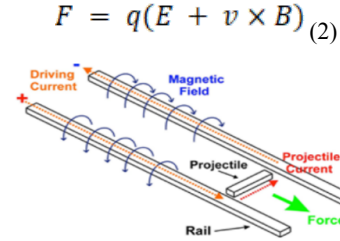
Şekil 3: Sistemin PCB tasarımı



Şekil 4: PCB'nin 3D görünümü

Projede öncelik 12V DC-400V DC güç besleme kartıdır. 400V DC gerilim kapasitörlerin şarj edilmesinde kullanılır. Bu bobinlerden akım geçtiğinde ileri yönlü manyetik alan

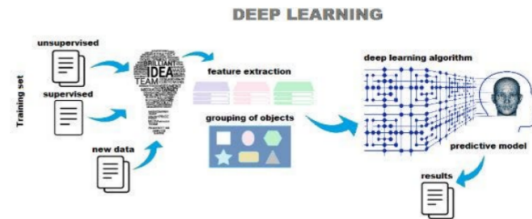
oluşturur. Manyetik alan içerisinde hareket eden parçacığa etkiyen kuvvet (Lorentz) prensibinden yola çıkarak mermi ateşlenmesi için gereken enerji sağlanmış olur [4]. F yüklü parçacığa etki eden toplam Lorentz kuvveti, q parçacığın elektrik yükü, E elektrik alan şiddeti, v parçacığın hızı, B manyetik alan yoğunluğu olmak üzere Lorentz prensibi denklem (2)'de verilmiştir. Şekil 5'te ise elektromanyetik fırlatma sistemlerine etkiyen Lorentz kuvveti gösterilmiştir.



Şekil 5: Elektromanyetik fırlatma sistemlerinde Lorentz kuvveti [4]

II.2. Yazılım Geliştirilmesi

Yazılım geliştirme sürecinde hedef takibi için görüntü işleme algoritması kullanılacaktır. Bu bağlamda görüntü işleme algoritmalarından Deep Learning (Derin Öğrenme) metodu kullanılacaktır. Bu Deep Learning algoritma yazılımı Raspberry Pi 4B kartı üzerinde yapılacaktır. Deep Learning algoritması insan zekâsı süreçlerini bilgisayar sistemleriyle taklit eden bir tür Machine Learning (Makine Öğrenimi) ve yapay zekadır (AI). Tahmine dayalı modellemeyi içeren istatistik ve veri biliminin önemli bir unsurudur. Büyük miktarda veriyi toplayıp analiz etmek ve yorumlamak veri bilimciler için son derece faydalıdır. Derin öğrenme bu süreci daha kolay ve hızlı hale getirir [5]. Deep Learning çalışma algoritması şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Deep Learning çalışma algoritması [6]

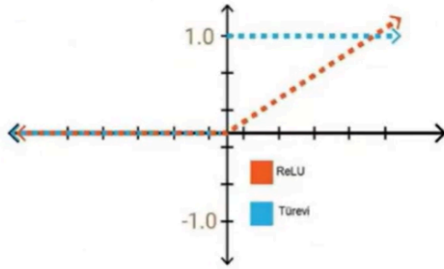
İlk aşamada, nesne algılama ve takip işlemleri için geniş bir veri seti oluşturulur. Bu veri seti hedef nesnenin farklı açılarda, farklı ışık koşullarında ve çeşitli arka planlarda çekilmiş görüntülerini içerir. OpenCV, bu verilerin işlenmesinde kullanılır; görüntüleri okunabilir formata getirme, kırpma, ölçeklendirme ve renk düzenleme gibi işlemler yapılır. TensorFlow ve YOLO kullanılarak model bu veri seti ile eğitilir. Eğitim sırasında model, hedef nesnenin özelliklerini öğrenerek bir sınıflandırıcı olarak şekillenir ve bu sayede gerçek zamanlı nesne algılamaya ve takip işlemlerinde daha hassas bir performans sağlar [7].

Bu sistemde, modelin doğrusal olmayan özellikleri öğrenebilmesi için ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu kullanılır. ReLU, giriş değerinin pozitif olması durumunda aynı değeri çıktı olarak verirken negatif değerlerde sıfır çıktısı verir. Bu işleyiş, hesaplama açısından avantaj sağlar ve modeli daha hızlı ve verimli hâle getirir. Derin öğrenme modellerinde sıkça kullanılan ReLU,

gradyanların kaybolması problemine karşı da dayanıklıdır ve bu nedenle ağırların daha derin katmanlarında bile öğrenme işlemini etkili bir şekilde sürdürebilir. Ayrıca ReLU modelin karmaşık kalıpları daha iyi öğrenmesini sağlayarak nesne algılama ve hedef takibi gibi görevlerde doğruluğu artırır [8]. ReLU aktivasyon fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem (3)'te ve grafiği Şekil 7'de verilmiştir.

$$ReLU(x) = \max(0, x)$$

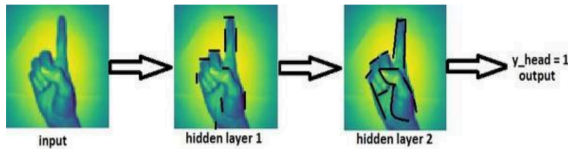
$$ReLU(yin) = y = \{x, \text{if } x > 0; 0, \text{if } x \leq 0\} \quad (3)$$



Şekil 7: ReLU fonksiyonunun grafiği [8]

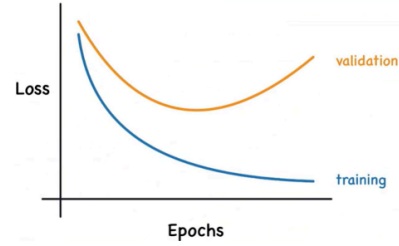
Bu aşamada modelin doğruluğu ve gerçek zamanlı performansı test edilir. Hedef nesnenin konum ve hareket bilgileri kullanılarak takip gerçekleştirilir. OpenCV, nesne takibi algoritmaları kullanılarak nesnenin hareket yolunu tahmin eder. TensorFlow ise hedefin hız ve yön gibi verilerini analiz ederek optimal fırlatma anını belirler. Fırlatma işlemi nesnenin tespit edilen konumuna göre otomatik olarak gerçekleşir. Bu aşamanın doğruluğu, nesneye ulaşma oranı ve isabet doğruluğu gibi metriklerle değerlendirilir [9].

Şekil 8'de, modelin eğitimiyle ilişkilendirilen örnek bir veri seti ve buna ait çıkış fonksiyonu gösterilmiştir. Girdi verisi, aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla işlenerek görüntü analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8: Girdi verisine bağlı çıktı üreten bir örnek fonksiyon[9]

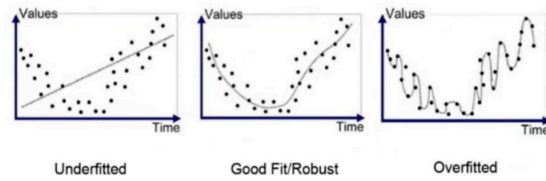
Model eğitimi sırasında eğitim setinden ayrı olarak kullanılan kontrol (validation) seti, modelin eğitilirken genel performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu veri seti, modelin aşırı uyum (overfitting) yapmasını engellemeye yardımcı olur. Eğitim sürecinin her döneminde (epoch) model, kontrol seti üzerindeki hatayı (validation loss) ölçer ve bu hata değeri üzerinden performansını izler. Bu sayede modelin eğitim sürecinde öğrendiği kalıpları sadece eğitim verisiyle sınırlı tutmayıp daha genellenebilir özellikler öğrenmesi sağlanır [10]. Eğer modelin kontrol hatası, eğitim hatasına kıyasla çok yüksek kalıyorsa modelin aşırı uyum gösterme eğiliminde olduğuna işaret eder. Şekil 9'da veri setinin eğitimi ve kontrol yazılımının karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 9: Veri setinin eğitimi ve kontrol yazılımının karşılaştırılması

Overfitting ve Underfitting: Overfitting, modelin eğitim verisine fazla uyum sağlaması ve bu yüzden yeni verilerde yetersiz performans göstermesi durumudur. Bu durumda model, eğitim verisinin gürültü ve detaylarını da öğrenir bu da genelleme gücünü zayıflatır. Underfitting ise modelin eğitim verisindeki kalıpları yeterince öğrenemediği durumu ifade eder. Bu durumda model, basit ya da karmaşık veriyi tam olarak anlamadığı için yetersiz performans gösterir. İdeal bir model, overfitting ve underfitting arasında dengeli bir noktada konumlanmalıdır; bu, modelin eğitildiği veriyi iyi anlaması ancak genelleme yapma gücünü kaybetmemesi gerektiği anlamına gelir [11]. Şekil 10'da veri setinin eğitilmesine ait değerlerin doğruluğu ve underfitting-overfitting durumları gösterilmiştir.

Yapay Sinir Ağlarında Overfitting ve Underfitting

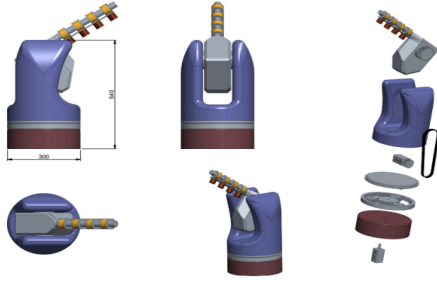


Şekil 10: Modelin underfitting-overfitting durumları [11]

Sonuç olarak; başarılı bir makine öğrenimi modeli oluşturmak için veri setinin doğru bir şekilde eğitim, kontrol ve test olarak ayrılması kritik bir adımdır. Eğitim seti, modelin öğrenme sürecini sağlarken kontrol seti modelin aşırı uyum yapmamasını sağlar ve test seti ise modelin gerçek dünyadaki performansını değerlendirir. Overfitting ve underfitting gibi problemleri önlemek için uygun model yapılandırması ve doğru duruş noktaları belirlenmelidir. Bu denge sağlandığında model hem eğitim verisine uyum sağlar hem de yeni verilerde güçlü bir genelleme yeteneği gösterir. Bu yaklaşım güvenilir ve genellenebilir sonuçlar elde etmek için model geliştirme sürecinin temelidir.

II.3. Mekanik Tasarımın Geliştirilmesi

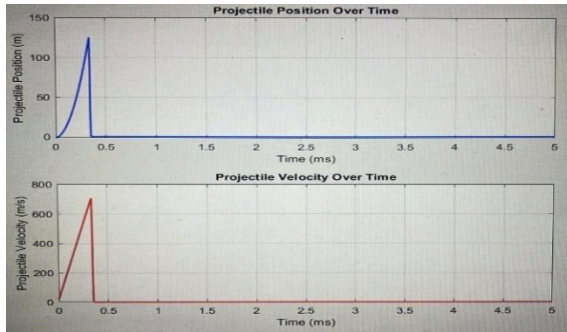
Mekanik tasarımın geliştirme süreci sistemde yer alacak olan rulmanlar, bobinler, elektronik kart ve görüntü işleme için kullanılacak olan kameranın hedef takibi için en uygun şekilde yerleştirilmesini kapsamaktadır. Proje, amacına uygun taşıyıcı gövdede yer alan gezegen dişliye bağlı 20 kg.cm'lik bir servo motordan ve üst gövdede namlunun hedef hareket takibini sağlayacak olan kasnağa bağlı diğer 25 kg.cm'lik bir servo motordan oluşmaktadır. Bu bağlamda SolidWorks programı üzerinde sistemin mekanik tasarımı yapılmıştır. Bu projenin 3D görseli Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: Projenin 3D tasarımı

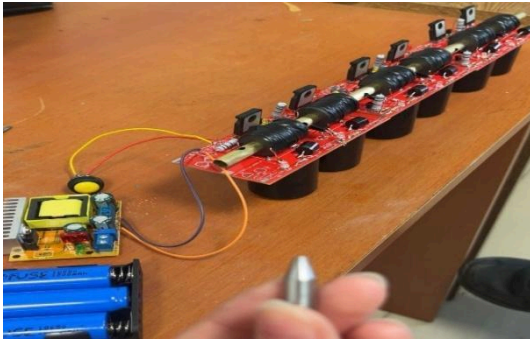
III. SONUÇLAR

Çalışmanın performans metrikleri MATLAB/ Simulink programında simüle edilmiş olup bu değerlere göre mermi maksimum 700m/s hızla, 0.4 saniyede 130 metre mesafedeki hedefi tam isabetle vurabilmektedir. Gerçekleştirilen simülasyonun değerleri şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12: Çalışmanın performans metrikleri

Elektromanyetik fırlatma sistemlerinde hedef tespiti ve takip performansını artırmak amacıyla sensör teknolojileri ile görüntü işleme algoritmalarının entegrasyonu bu çalışmada başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme tabanlı nesne tanıma algoritmaları kullanılarak, hareketli ve küçük hedeflerin etkin takibi sağlanmış, manuel hedef seçimine bağlı hata payı önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu sayede sistemin atış doğruluğu ve hızı artmış, otomatik hedef takibi mekanizması ile operasyonel verimlilik yükseltilmiştir. Elde edilen bulgular, elektromanyetik fırlatma sistemlerinin mühendislik uygulamalarında daha güvenilir, hassas ve etkin kullanılabilceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, model optimizasyonu ve donanım entegrasyonları ile sistem performansının daha da iyileştirilmesi planlanmaktadır. Şekil 13’te elektromanyetik tasarımının tamamlanmış hâli verilmiştir.



Şekil 12: Elektromanyetik tasarımının tamamlanmış hâli

Bu çalışmada geliştirilen elektromanyetik fırlatma sistemi, yüksek hız ve doğruluk potansiyeline sahip olsa da güvenlik ve etik açıdan dikkatle ele alınmalıdır. Yaklaşık 700 m/s hızlara ulaşabilen sistem ciddi yaralanmalara yol açabilecek güte olup, yüksek voltajlı bileşenler kullanıcı açısından risk teşkil etmektedir. Bu nedenle, bu tür projelerin yalnızca bilimsel ve savunma amaçlı, denetimli ortamlarda geliştirilmesi ve barışçıl kullanım ilkesi doğrultusunda yürütülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, proje süresince tüm güvenlik önlemleri alınmış, etik kurallar gözetilmiş ve çalışma bu sorumluluk bilinciyle tamamlanmıştır.

IV. KAYNAKLAR

- [1] Gezer, H.A., Engin, T., (2016). The inspection of effect of propellant granule geometry on gun interior ballistics. Sakarya University Journal of Science, 20(2), 251-257.
- [2] Akyazı, Ö., Bozdağ, M. O., & Akpınar, A. S. (2015). Elektromanyetik Fırlatıcı Alan Savunma Sistemi Tasarımı ve Gerçeklenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(2), 43-50.
- [3] Harmankaya, A., Çelik, S., (2016). Elektromanyetik Bobin Silahı. KTÜ Lisans Bitirme Projesi. <https://silo.tips/download/tc-karadeniz-teknik-universitesi-muhendislik-fakltesi>
- [4] Polzin, K. A., Cipriano, A. B., Martin, A. K., Liu, C. Y. (2019). Coilgun Acceleration Model Containing Multiple Interacting Coils. NASA-George C. Marshall Space Flight Center ve Georgia Institute of Technology. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1247>
- [5] Şeker, A., Diri, B. ve Balık, H. H. (2017). Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(3), 47-64.
- [6] Onar, A. (2021). Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları. <https://alitinacanonar.medium.com/derin-%C3%B6%C4%9Frenme-y%C3%B6ntemleri-ve-uygulamalar%C4%B1-1ce215de40e8>
- [7] Nur, H. (t.y.). Research on Tensor Flow with a system for large-scale machine learning. Genovasi University College, https://www.researchgate.net/publication/363937209_Research_on_Tensor_Flow_with_a_system_for_large-scale_machine_learning
- [8] Kılıçarslan, S., Adem, K. ve Çelik, M. (2021). “An overview of the activation functions used in deep learning algorithms. Journal of New Results in Science, 10(3), 75-88.
- [9] Hanbay, K. ve Üzen, H. (2017). Nesne tespit ve takip metotları: Kapsamlı bir derleme. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 6(2), 40-49.
- [10] F. Akar ve İ. Akgül (2022). Derin Öğrenme Modeli ile Yüz İfadelerinden Duygu Tanıma. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1), 69-79.
- [11] Prajapati, A. K. ve Singh, U. K. (2024). An optimal solution to the overfitting and underfitting problem of healthcare machine learning models. Institute of Computer Science, Vikram University. <http://dx.doi.org/10.29207/joseit.v2i2.5460>

PID Kontrollü, Topoloji Optimizasyonlu ve Görüntü İşlemeli Otonom Arama Kurtarma Dronu

Mert Baykal, Eray Çağlar, Yusuf Coşkun

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Arama ve kurtarma operasyonları, özellikle geniş ve erişimi zor bölgelerde zamanla yarışılan kritik süreçlerdir. Bu proje, arama kurtarma operasyonlarının etkinliğini artırmak amacıyla otonom bir insansız hava aracı (İHA) sistemi geliştirmeyi hedeflemektedir. Sistem; gelişmiş veri füzyonu, akıllı görüntü işleme teknikleri ve hava, kara ile deniz platformları arasında koordineli iletişim sağlayan bir altyapı üzerine kurulacaktır. Temel amaç, İHA'nın kayıp bireyleri otonom olarak tespit etmesi, konum bilgilerini diğer insansız araçlara ve uzaktan kontrol merkezlerine iletmesi ve böylece müdahale süresini önemli ölçüde kısaltmasıdır.

Proje kapsamında İHA gövdesi, 3D baskı teknolojisi kullanılarak hafif ve dayanıklı bir şekilde üretilmektedir. Gövde tasarımı, ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilen yapısal analizler (topoloji optimizasyonu ve seçim analizi) sonucunda optimize edilecektir. Uçuş stabilitesi ve otonom navigasyon, Arduino Mega platformunda geliştirilecek PID (Oransal-İntegral-Türev) kontrol algoritmaları ile GPS ve IMU sensörlerinin entegrasyonu sayesinde sağlanacaktır. Görüntü işleme yetkinlikleri ise OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiş algoritmalarla hedef tanıma doğruluğunu artıracaktır.

Bu bütünsel yaklaşım, modüler, maliyet etkin ve sahada hızlı bir şekilde konuşlandırılabilir bir çözüm sunarak arama kurtarma operasyonlarının verimliliğine ve başarısına somut katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, Arama Kurtarma, PID Kontrol, Görüntü İşleme, Yapısal Optimizasyon, 3D Baskı.

I. GİRİŞ

Arama kurtarma (AK) operasyonlarının başarısı, insan hayatlarının kurtarma misyonunda kritik rol oynadığı acil operasyonda hayati önem vereceğiz. Geniş, engebeli veya tehlikeli arazilerde yürütülen bu operasyonlar, geleneksel olarak hem kişisel açıdan açıklık hem de zaman ve kaynak tüketimi bakımından ortaya çıkabilir. Son yıllarda, insansız hava araçları (İHA'lar) veya dronlar, sundukları hızlı konuşma, geniş alanları tarama yeteneği, üstün yetenek ve çeşitli sensör yükleriyle donatılabilme sistemi sayesinde AK senaryolarında rotasyon niteliğinde bir potansiyel sergilemektedir. Dronlar, sonradan hasar görülmesi, kaybeden kişilerin aranması ve acil durum malzemelerinin ulaştırılması gibi pek çok kritik görevde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Ancak drone teknolojisinin AK operasyonlarındaki potansiyelinin tam olarak gerçekleştirilmesinin önünde önemli bir güç bulunmaktadır: heterojen platformlar (hava, kara, deniz araçları) arasında sürekli, gerçek zamanlı ve otonom bir koordinasyon eksikliği. Mevcut programlar genellikle tekil drone operasyonlarına veya sınırlara entegrasyona sahiptir, bu da karmaşık ve dinamik AK senaryolarında optimal kaynak işletim ve bilgi kapasiteleri engellenemez. Bu durum, tespit edilen kritik bilgilerin diğer müdahale unsurlarının aktarımında gecikmelere ve dolayısıyla verimlilikte düşüşe yol açabilmektedir.

Bu çalışma, tam da bu parçaların hedef alarak, arama kurtarma görevlerinin başarısını ve yeteneklerini kökten değiştirebilecek, bütünsel ve akıllı bir otonom drone sistemi önermektedir. Projemizin temel amacı, otonom olarak hedefleyebilmek, elde sağladığı konumsal ve görsel veriyi tek başına diğer insansız sistemlere (kara ve deniz araçları) ve bir komutalı atış aktarabilen, böylece uyumlu bir müdahale gücü oluşturan bir drone platformuna dağıtmaktır.

Bu amaçla, CATIA ile aerodinamik ve mekanik, ANSYS yazılımı ile kapsamlı yapısal analizler (statik analiz ve kritik bilgiye sahip topoloji organizasyonu), 3D baskı teknolojisi ile maliyet-etkin ve hızlı prototipleme, quadcopter dinamik modeline dayalı Mega tabanlı PID kontrolcülerile hassas uçuş kontrolü ve OpenCV oranı destekli geliştirilmiş tasarım işleme yöntemleriyle hedefleyerek multidisiplinerleri bir araya getirilecektir. Geliştirilecek sistemin modüler yapısı, düşük maliyetli ve sahada hızlı bir şekilde adapte edilebilirliği, pratik pratikliğini ve yaygın etki potansiyelini artıracaktır.

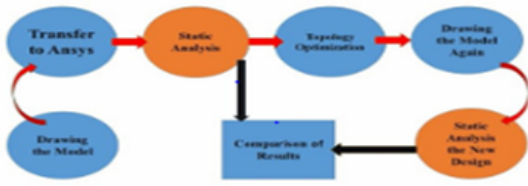
II. YÖNTEM

Bu bölümde, projenin temel metodolojisi üç ana başlık altında sunulmaktadır. İlk olarak, bu bildirinin ana odağı olan yapısal tasarım ve topoloji optimizasyonu süreci detaylandırılacak, ardından planlanan uçuş kontrol sistemi ve görüntü işleme yaklaşımlarına değinilecektir.

II.1. Yapısal Tasarım ve Topoloji Optimizasyonu

Bu çalışmada, arama-kurtarma operasyonları için tasarlanan bir dronun alt gövde ve kanat bileşenlerine topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. İlk olarak, modelin tasarımı bilgisayar destekli bir çizim programı olan CATIA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, monte edilen modelin alt gövde ve kanat bileşenleri bir step dosyasına dönüştürülerek analiz programı olarak kullanılan ANSYS'e aktarılmıştır. Bu adımlardan sonra, sınır koşullarına bağlı kalarak parçaların statik ve mukavemet özelliklerini incelemek için statik analiz yapılmıştır. Statik analiz sonuçlarına göre topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonuçlarına dayanarak yeniden yapılandırılan tasarım CATIA'da yeniden çizilmiş ve tekrar statik analize tabi tutulmuştur. Optimize edilmiş parçalar ile

orijinal parçaların analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Çalışmanın akış şeması

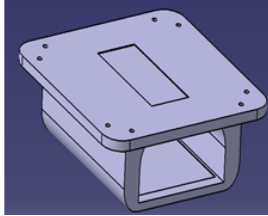
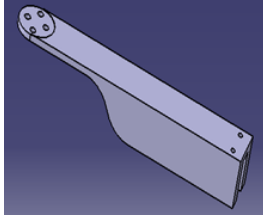
II.1.1. Ön modelleme ve ilk statik analiz

II.1.2. Drone Alt Gövde ve Kanatlarının Modeldenmesi

Dron, CATIA'da alt gövde, üst gövde, kanatlar ve motor bağlantı noktaları dahil altı ana gövdede modellenmiş ve monte edilmiştir. Alt gövde, Raspberry Pi, hidrojen iyon pil ve sensörlerin özelliklerine uygun modüler bir olabilmek özelliği vardır. Kanatlar, aerodinamik verimlilik için optimize edilmiştir. Model, step formatına dönüştürülerek ANSYS'e aktarılmış ve statik analiz yapılmıştır. 3D yazıcıda PLA malzemesiyle üretilebilecek modelin mekanik özellikleri (yoğunluk, elastisite modülü, Poisson oranı) ANSYS malzemesi ayarlanabilirine ayarlanabilir. Tasarımların görüntüsü Şekil 2'de ve 3'te sunulmuştur. PLA özellikleri tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: PLA özellikleri

Yoğunluk	Elastisite Modülü	Poisson Oranı
1,24 gr/cm ³	3.5 GPa	0,36



Şekil 2: Drone kanat modeli Şekil 3: Drone alt gövde modeli

II.1.3. Statik Yüklerin Tanımlanması

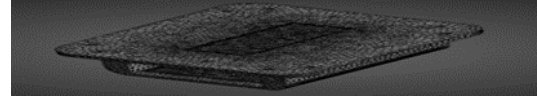
yapmak için parçanın birbirine geçirilmesi gerekir. Ağ oluşturma, sonlu elemanlar analizinde temel bir adımdır. Bu işlem, analizin daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için karmaşık bir nesnenin basit parçalara bölünmesine izin verir. Daha yoğun bir ağ genellikle daha doğru sonuçlar verir ancak hesaplama süresini artırır. Bu basit elemanlar, malzemenin tepkisini daha yakından takip eder ve sonuçların lokalize edilmesini sağlar. Ağ, sınır koşullarını ve dış yükleri tanımlamak için de gereklidir. Parçaların mesh sonucuna göre düğüm ve eleman sayısı matematiksel olarak hesaplanmıştır ve Tablo 2'de verilmiştir. Ağ ile işlenmiş kısım Şekil 4'te ve 5'te verilmiştir.

Tablo 2: Mesh yapısının düğüm ve eleman özellikleri

Parçalar	Düğüm	Eleman
Kanat	93156	53528
Alt Gövde	117966	67984

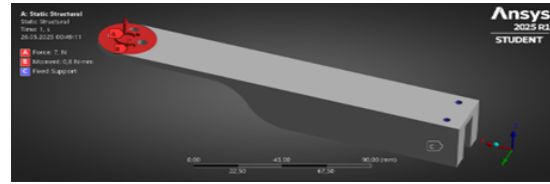


Şekil 4: Kanatta mesh uygulaması

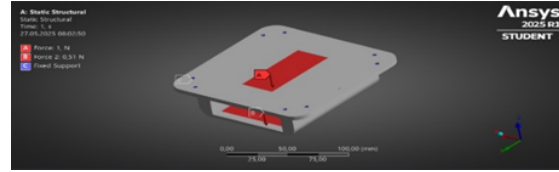


Şekil 5: Alt gövdede mesh uygulaması

Statik analizin yapılabilmesi için parçalara sınır koşullarının verilmesi gerekmektedir. Parçaların sabitleneceği yeri ve kuvvet uygulanacağı yerleri vermek gerekir. Sınır koşullarına sahip parçaların görüntüsü Şekil 6'da ve 7'de verilmiştir.



Şekil 6: Kanatın sınır koşullarının belirlenmesi



Şekil 7: Alt gövdenin sınır koşullarının belirlenmesi

II.1.4. Statik Analizin Gerçekleştirilmesi

Statik analiz, belirlenmiş koşulların sınır çerçevesi gerçekleştirilmiş ve sonuçlandırılmıştır. Bu analiz, parçanın dış etkilerinin karşısındaki mekanik direncin değerlendirilmesi için yapılmıştır. Mühendislik terminolojisinde "gerilme", malzeme üzerine etki eden kuvvetin biriminin parçalarının ifade ettiği ve yükün malzeme içinde nasıl dağıldığının anlaşılmasına olanak tanır. Bu bilgi, malzeme kırılma eğilimi, şekil değiştirme veya diğer olası arızalara karşı verilerin belirlenmesinde temel bir rol oynar. Gerilme durumları, Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Gerilme sonuçları

Parçalar	Gerilme Değerleri (MPa)
Alt Gövde	2.5
Kanat	3,9497

Toplam deformasyon, uygulanan yükler ve sınır koşulları sonucunda bir malzemenin veya yapısal elemanın ne kadar deforme olduğunu ifade eden bir niceliktir. Tablo. 4'te görüldüğü gibi, parçaların sırasıyla toplam yer değiştirmesi 4,7 ve 1,5mm'dir. Bu yer değiştirmeler, uygulanan sınır koşullarına göre parçaların toplam yer değiştirmesidir.

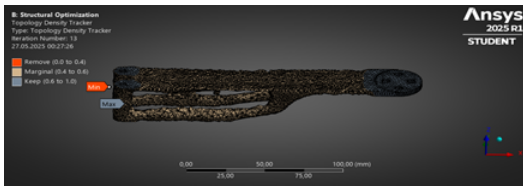
Tablo 4: Toplam deformasyon sonuçları

Parçalar	Toplam Deformasyon Değerleri(mm)
Alt Gövde	4.7
Kanat	1,507

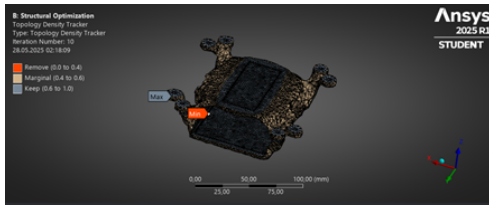
II.2.Topoloji Optimizasyonu

II.2.1.Optimizasyon Parametrelerinin Tanımlanması

Topoloji optimizasyonu, belirli bir tasarım alanındaki malzeme dağılımını optimize ederek belirtilen performans kriterlerini en üst düzeye çıkarmak için kullanılan yapısal bir optimizasyon yöntemidir ve bu süreç, yapısal performansı korumayı amaçlarken malzeme kullanımını en aza indirerek hafif ancak işlevsel ve dayanıklı tasarımlar elde etmeyi amaçlar. Analiz, Ansys programında 48 iterasyon ile gerçekleştirilmiştir. Hacim ve kütle oranının %50 oranında azaltılması istenmektedir. Analiz öncesi parçanın hacmi programda kanat parçası 80716 mm³ ve kütlesi 100 gram olarak ölçülmüştür. Analiz öncesi parçanın hacmi programda alt gövde parçası 2,3621'e+005 mm³ ve kütlesi 300 gram olarak ölçülmüştür. Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan yeni model Şekil 9'da ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8: Yeni optimizasyon kanat modeli



Şekil 9: Yeni optimizasyon alt gövde modeli

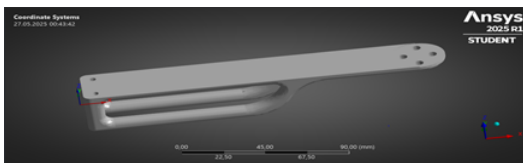
II.2.2.Optimizasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Optimizasyon sonucuna göre, parçanın kütlesi ve hacmi neredeyse %49,86 oranında yarı yarıya azaldı. Parçanın yeni hacmi 12.524 mm³ ve kütlesi 15.655 gram olarak ölçülmüştür. Tablo.5 Yeni modelin elastik gerinim sonuçları

II.3.Optimize Edilmiş Modelin Yeniden Modellenmesi ve Analizi

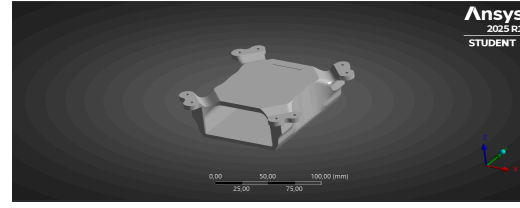
II.3.1. Optimize Edilmiş Parçaların Modellenmesi

Optimizasyon sonucunda ortaya çıkan yeni tasarımlar parçalı tasarım olduğu için modelleme manuel olarak yeniden yapıldı. Yeni tasarımlar, optimize edilmiş parçalara benzeyecek şekilde yapıldı. Ansys programının bir alt penceresi olan Space Claim'de yeniden çizildi. Yeni modeller Şekil 10'te ve Şekil 11'te gösterilmiştir.



Şekil 10: Optimizasyon sonrası kanat model tasarımı

gösteriyor. Ancak deformasyonda %52,6'lık ve gerilimde %4,9'luk artış var. Bu artışlar, dayanıklılık dayanıklılık



Şekil 11: Optimizasyon sonrası alt gövde model tasarımı

II.3.2. Optimize Edilmiş Tasarımın Statik Analizi

Modelin son versiyonu doğruluk ve güvenilirlik açısından değerlendirildi. Bu doğrulama sürecinde model, belirli sınır koşullarına göre standartlaştırılmış bir örgü yapısı ile Ansys simülasyon programında statik analize tabi tutulmuştur. Bu kapsamlı analiz sonucunda elde edilen gerilme ve toplam deformasyon Tablo.5'te verilmiştir. Bu sonuçlar, modelin genel performansını ve uygulama potansiyelini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Tablo 5. Alt gövdede ve kanatta statik analiz sonuçları

Parçalar	Gerilme Değerleri (MPa)	Toplam Deformasyon Değerleri(mm)
Alt Gövde	3.5	1.997
Kanat	4.14	2.3

Tablo 6. Alt gövdede optimizasyon öncesi ve sonrası analiz karşılaştırması

Analiz Parametreleri	Optimizasyon Öncesi	Optimizasyon Sonrası
Toplam Deformasyon (mm)	4.7	1.997
Gerilim	2.5	3.5
Ağırlık (gr)	300	160
Hacim (mm ³)	2,3621'e+005	1,5621'e+005

Deformasyonda %57,5'lik azalma ve ağırlıkta %46,7'lik, hacimde %33,9'luk düşüşün gerçekleştirildiği gösteriliyor. Ancak gerilimde %40'lık artış, malzemenin gerilime maruz kalma durumu ve dayanıklılık sınırlarının incelenmesine işaret ediyor.

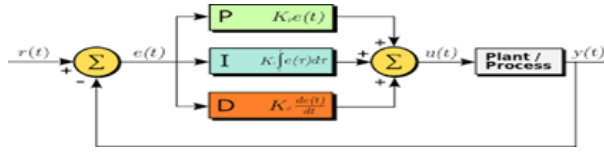
Tablo 7: Kanatta optimizasyon öncesi ve sonrası analiz karşılaştırması

Analiz Parametreleri	Optimizasyon Öncesi	Optimizasyon Sonrası
Toplam Deformasyon (mm)	1.507	2.3
Gerilim	3,947	4.14
Ağırlık (gr)	100	54
Hacim (mm ³)	80716	4700

Ağırlıkta %46'lık ve hacimde %94,2'lik ciddi bir azalma sağlanmış, bu tasarımın daha hafif ve kompakt hale geldiğini

sınırları zorlanabilir ve güvenlik açısından kontrol edilmelidir.

II.4. Uçuş Kontrol Sistemi (PID)

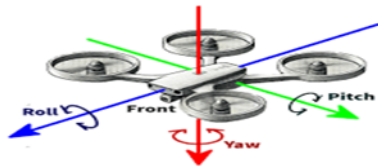


Şekil 12: PID bir sistemin blok diyagramı

Geliştirilecek PID kontrol sistemi, her bir eksen için ayrı kontrol döngüleri tanımlayarak, sensör verileri ile belirlenen hata miktarlarını minimize etmeye çalışacaktır.

PID algoritması, sistemdeki hatayı (istenilen değer ile ölçülen değer arasındaki farkı) minimize etmeye yönelik klasik bir kontrol yaklaşımı sunar. Oransal kazanç (K_p), hataya anlık tepki Bu çalışmada, dört rotorlu bir insansız hava aracının (quadcopter) kararlı ve otonom uçuşunu sağlamak amacıyla Arduino Mega mikrodeneleyici kartı üzerinde gömülü bir PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrol algoritmasının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilecek sistem, uçuş esnasında oluşabilecek dengesizlikleri ve konumsal sapmaları düzeltmek amacıyla Ataletsel Ölçüm Birimi'nden (IMU – Inertial Measurement Unit) elde edilen ivmeölçer ve jiroskop verilerini işleyerek, aracın üç eksenindeki (roll, pitch, yaw) açısal duruşunu ve yüksekliğini hassas bir şekilde kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Sistem aynı zamanda, GPS modül entegrasyonu ile birlikte otonom görev tanımlarının gerçekleştirilmesine de olanak sağlayacaktır.

Quadcopter sistemleri, temel olarak dört motorun itki kuvvetine dayalı olarak üç boyutta hareket kabiliyeti sunar. Bu hareketler; roll (x-ekseni etrafında sağa/sola eğilme), pitch (y-ekseni etrafında öne/arkaya eğilme), yaw (z-ekseni etrafında yönelme/dönme) ve throttle (dikey eksende yükselme/alçalma) eksenlerinde gerçekleştirilir. Bu dört temel kontrol ekseni, birbirine entegre çalışarak aracın dengeli ve yönlendirilmiş hareketini mümkün kılar.



Şekil 13: Bir sistem üzerinden Yuvarlanma (Roll), Eğim (Pitch), Sapma (Yaw) gösterimi

Verirken, İntegral kazanç (K_i) zamanla biriken hata miktarını düzeltir, Türevsel kazanç (K_d) ise hatanın değişim hızına karşı tepki geliştirerek sistemin aşırı salınım yapmasını önler. Bu üç parametrenin optimal değerleri, deneysel testler, uçuş senaryoları ve simülasyon çalışmaları doğrultusunda belirlenerek sistemin dinamik kararlılığı artırılacaktır. Ayrıca, kontrol algoritmalarında filtreleme teknikleri (örneğin, düşük geçiş filtreleri veya Kalman filtresi) uygulanarak sensör verilerindeki gürültü azaltılacak ve daha kararlı kontrol yanıtları elde edilecektir.

Sisteme entegre edilecek GPS modülü, drone'un küresel konum bilgisini sağlayarak konum tabanlı otonom görevlerin gerçekleştirilmesine olanak tanıyacaktır. GPS verileri kullanılarak belirli koordinatlara yönelme, önceden tanımlı bir rotayı izleme veya belirli bir konumda sabit kalma (pozisyon koruma) gibi görevler icra edilecektir. Bu

tür görevlerde, konum hataları yön ve hız düzeyinde çözümlenerek, pitch ve yaw kontrol döngülerine entegre edilecek ve drone'un rota üzerindeki sapmalarına karşı düzeltici manevralar yapılacaktır. Böylece, hem yönelimsel kontrol hem de konum kontrolü bütüncül bir sistem içerisinde otonom olarak sürdürülebilecektir.

Donanım açısından Arduino Mega platformunun tercih edilme nedeni, sahip olduğu yüksek giriş/çıkış port sayısı, geniş bellek kapasitesi ve gerçek zamanlı işlem yapma yeterliliğidir. Bu sayede IMU sensörü, ESC (Elektronik Hız Kontrolcü) modülleri, GPS modülü ve diğer çevresel birimlerin senkronize çalışması mümkün olacaktır. Geliştirilecek yazılım mimarisi, modüler bir yaklaşımla yapılandırılacak; her bir bileşen (örneğin, sensör okuma, filtreleme, PID kontrol, uçuş modları, hata yönetimi) ayrı fonksiyonel bloklar hâlinde tanımlanacaktır. Bu sayede sistemin yeniden yapılandırılması, bakım ve geliştirme süreçleri kolaylaştırılacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan PID tabanlı kontrol sistemi; manuel kontrol modlarına ek olarak, konum tabanlı otonom uçuş modlarını da destekleyen, dinamik koşullara uyum sağlayabilen, güvenilir ve düşük maliyetli bir kontrol mimarisi sunmayı amaçlamaktadır. Proje çıktıları, başta sivil havacılık, tarım, çevresel izleme ve afet yönetimi olmak üzere çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilecek, genişletilebilir bir drone platformu için temel oluşturacaktır.

II.5. Görüntü İşleme ile Otonom Hedef Tespiti (OpenCV)

Dronun AK görevlerindeki etkinliğini artırmak için, üzerine entegre edilecek yüksek çözünürlüklü bir kamera ve Raspberry Pi gibi bir gömülü sistem üzerinde çalışacak görüntü işleme algoritmaları geliştirilecektir. Bu algoritmalar, OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilecek ve özellikle insan tespiti üzerine odaklanacaktır. Renk, şekil ve doku analizi gibi klasik görüntü işleme tekniklerinin yanı sıra, kaynakların elvermesi durumunda derin öğrenme tabanlı nesne tanıma modellerinin (örneğin, YOLO, SSD) kullanımı da değerlendirilecektir. Tespit edilen hedeflerin GPS koordinatları, yer kontrol istasyonuna veya diğer kurtarma birimlerine anlık olarak iletilecektir.

III. SONUÇLAR

Bu çalışma, Arduino Mega tabanlı bir insansız hava aracı (İHA) kontrol sistemi geliştirilerek, sensör verilerine dayalı kararlı ve otonom uçuş kabiliyetinin sağlanmasını amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem, düşük maliyetli donanım bileşenleri ile yüksek işlevsellik sağlayan bir mimari sunmakta ve açık kaynaklı yazılım tabanı sayesinde ileri düzey kontrol algoritmalarının uygulanmasına olanak tanımaktadır. Proje kapsamında özellikle üç temel bileşen ön plana çıkmaktadır: PID temelli denge kontrolü, IMU verilerinin işlenmesiyle uçuş stabilizasyonu ve GPS destekli otonom görevlerin gerçekleştirilmesi.

Çalışmanın ilk aşamasında, MPU6050 tabanlı IMU sensöründen alınan ivmeölçer ve jiroskop verileri kullanılarak dronun açısal konum bilgileri elde edilmiştir. Bu veriler, roll (yana yatma), pitch (öne/arkaya eğilme) ve yaw (dönme) eksenlerinde uçuş dengesinin sağlanması için tasarlanan PID kontrol algoritmalarına girdi olarak verilmiştir. Her bir eksen için ayrı ayrı tanımlanan PID

denklemleri, dronun referans pozisyona olan sapmasını minimize edecek şekilde sürekli olarak hata düzeltmeleri üretmiştir. Böylece sistem, dışsal bozucu etkiler (rüzgar, ani manevralar, yük dengesizliği vb.) karşısında kararlılığını muhafaza edebilmiştir.

PID katsayıları (K_p , K_i , K_d), sistemin dinamik tepkilerini modelleyen MATLAB/Simulink tabanlı simülasyon ortamlarında analiz edilerek ön ayarlamaları yapılmış; ardından gerçek uçuş testleriyle deneysel ince ayarlar gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte sistemin tepkime süresi, aşım miktarı, salınım süresi ve nihai denge hatası gibi performans metrikleri optimize edilmiştir. Elde edilen bulgular, iyi ayarlanmış PID parametrelerinin özellikle kararlı hover (askıda kalma) uçuşunda ve ani yön değişimlerinde sistemin güvenliğini artırdığını göstermiştir.

Yükseklik kontrolü içinse IMU verilerinin yanında barometrik sensör ve ultrasonik sensör kombinasyonu değerlendirilmiş, böylece hem kapalı alanlarda hem açık ortamlarda başarılı irtifa kontrolü sağlanmıştır. Sistemin ivme verilerinden kaynaklı gürültüler, Kalman filtresi ile azaltılarak ölçüm doğruluğu artırılmıştır.

Bunun yanında, GPS modülünün entegrasyonu ile drona konum temelli otonom görevler yüklenmiştir. Bu görevler arasında belirli koordinatlara uçuş, sabit bir rotanın izlenmesi, belirlenen hedefe yönelme ve noktasal konumda sabit kalma gibi uygulamalar yer almıştır. GPS verileri ile PID kontrol yapısı arasında kurulan uyumlu yapı sayesinde, sistem çevresel faktörlere rağmen yüksek konumsal doğrulukla hareket edebilmiş ve görevini başarıyla tamamlayabilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma; düşük maliyetli donanım elemanları ve açık kaynak platformlar kullanılarak, yüksek performanslı, güvenilir ve otonom görevleri yerine getirebilen bir drone kontrol sistemi geliştirmenin mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Geliştirilen sistem, özellikle arama-kurtarma, afet müdahalesi, tarımsal gözlem ve çevresel veri toplama gibi sahada otonom görev gerektiren uygulamalarda kullanılmaya uygundur.

Gelecek çalışmalarda, kontrol algoritmalarına bulanık mantık, adaptif PID veya makine öğrenmesi tabanlı kontrol stratejilerinin entegrasyonu planlanmaktadır. Ayrıca, görüntü işleme teknikleri (OpenCV tabanlı) kullanılarak hedef tanıma ve nesne takibi gibi ileri seviye görevlerin gerçekleştirilmesi, sistemin tam anlamıyla otonom bir karar verme yapısına ulaşmasını sağlayacaktır. Projenin ilerleyen safhalarında 3D yazıcı ile üretilen optimize edilmiş yapısal bileşenlerin saha testleri de gerçekleştirilerek hem mekanik hem yazılımsal tasarım bütünsel olarak değerlendirilecektir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca akademik düzeyde teknik bir katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda toplumsal fayda odaklı mühendislik çözümlerinin uygulanabilirliğini de ortaya koymaktadır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] ANSYS Inc. (2023). ANSYS Mechanical User's Guide. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- [2] Bai, X., Li, Y., & Zhang, H. (2023). Derin öğrenme tabanlı hedef tanıma üzerine bir çalışma. Yapay Zeka Uygulamaları Dergisi, 12(3), 115-128. (Örnek künye - Lütfen orijinal bilgilerle değiştirin)

- [3] Bashar, M., Rahman, M. A., & Rony, M. S. (2021). Sivil uygulamalarda drone teknolojisinin yükselişi: Bir derleme. İnsansız Sistemler Teknolojisi Dergisi, 9(4), 210-235. (Örnek künye)
- [4] Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications. Springer Science & Business Media.
- [5] CATIA V5 Documentation. (2023). Dassault Systèmes.
- [6] Dey, S., & Ghosh, S. (2021). Afet yönetiminde drone tabanlı hızlı haritalama ve hasar tespiti. Afet Bilimi ve Mühendisliği Dergisi, 15(3), 176-189. (Örnek künye)
- [7] Gao, Y., Liu, X., & Wang, Y. (2023). Drone üretiminde 3D baskı teknolojilerinin optimizasyonu. Katmanlı İmalat Dergisi, 60, 102134. (Örnek künye)
- [8] Keller, J., Mendez, J., & Duran, A. (2022). Hafif drone yapıları için topoloji optimizasyonu uygulamaları. Yapısal ve Multidisipliner Optimizasyon, 65(4), 123. (Örnek künye)
- [9] Kumar, A., & Jain, A. (2022). Quadcopterler için uyarlanabilir PID kontrolcü tasarımı ve uygulaması. Kontrol Mühendisliği Uygulamaları, 105, 104567. (Örnek künye)

Arama Kurtarma Çalışmaları İçin Tasarlanmış Örümcek Robotun Optimize Edilmiş Tasarımı

Mehmet Can Karabıyık, Ali İmran Nuhoğlu, Kerem Ali Taş, Yusuf Coşkun

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, doğal afetlerde arama kurtarma amaçlı biyomimetik örümcek robot tasarımına odaklanmaktadır. Literatürdeki maliyet ve malzeme fazlalığı sorunlarına yanıt olarak, topoloji optimizasyonu ile malzeme minimizasyonu ve yapısal mukavemetin korunması hedeflenmektedir. Proje ayrıca, robotun kinematik modellemesini, denklemlerinin çıkarılmasını ve simülasyonla konum kontrolünün gösterilmesini içermektedir. Bu multidisipliner yaklaşım, optimize edilmiş ve teorik temelli bir arama kurtarma robotu geliştirmeyi amaçlar.

Anahtar Kelimeler: Yapısal Analiz, Robotik, Topoloji Optimizasyonu.

I. GİRİŞ

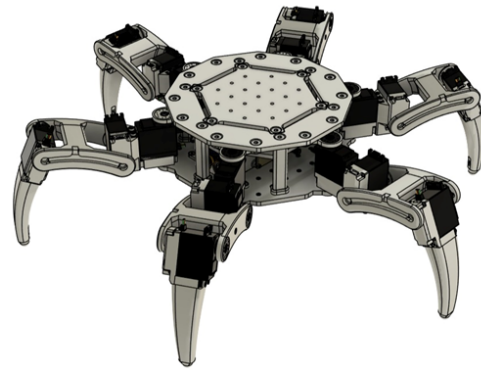
Robotik teknolojiler, günümüzün teknolojik dönüşüm sürecinde merkezi bir rol üstlenmektedir. Yapay zekâ, sensör sistemleri ve gömülü donanım gibi alanlardaki ilerlemeler, robotların algılama, hareket ve karar verme yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir [1–3]. Bu gelişmeler, yalnızca sanayide değil; tıp, tarım, savunma ve uzay keşfi gibi alanlarda da robotların etkin kullanımını mümkün kılmaktadır [4]. Özellikle yürüyen robotlar, düzensiz ve engebeli zeminlerde sağladıkları hareket kabiliyetiyle dikkat çekmekte ve insan için riskli ortamlarda güvenli operasyonlar sunmaktadır [5–6]. Bu nedenle, bu robotların daha çevik, stabil ve otonom hale getirilmesi hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda öncelikli bir araştırma konusu haline gelmiştir [7–12].

Yürüyen robotlar, bacak sayısı, yürüyüş dizilimi ve serbestlik derecelerine göre sınıflandırılmaktadır [13]. İki bacaklı sistemler insan yürüyüşünü taklit ederken, dört ve altı bacaklı robotlar genellikle hayvan ya da böcek benzeri yapıları temel alır [14,15]. Altı bacaklı robotlar, tripod yürüyüş modeli sayesinde her adımda üç bacağı ile zemine temas ederek yüksek statik denge sağlar [16,17]. Bu sayede devrilme riski azalırken, bağımsız hareket edebilen bacaklar çevresel engellere karşı esneklik sunar [18–21]. Özellikle örümcek tipi robotlar, alçak ağırlık merkezleri ve yayvan yapıları sayesinde zorlu arazilerde dengeli ve çevik hareket edebilir [23]. Bu robotlar; enkaz altı arama kurtarma, dar boru hatları, nükleer tesisler gibi erişimi güç ve tehlikeli ortamlarda etkili çözümler sunar [10,24]. Ayrıca, askeri keşif görevlerinden tarımsal denetimlere ve uzay çalışmalarına kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir [25–27].

Bu çalışmada, örümcek tipi altı bacaklı bir robotun tasarımı, üretimi ve mühendislik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir bacak, üç serbestlik derecesi ile yapılandırılmıştır. İlk olarak ileri kinematik analizle hareket modeli oluşturulmuş, ardından Ansys yazılımı ile topoloji optimizasyonu yapılarak malzeme kullanımı verimli hale getirilmiştir. Statik analizle sistemin yük altındaki dayanımı değerlendirilmiş, modal analizle ise doğal frekanslar belirlenerek rezonans riskleri analiz edilmiştir. Bu çalışmalar, robotun yalnızca laboratuvar değil, gerçek saha koşullarında da etkin çalışmasını hedeflemektedir.

II. TASARIM

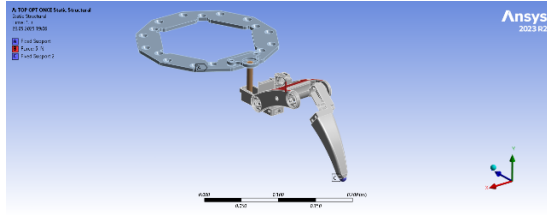
Robotun mekanik tasarımı, SolidWorks ortamında modellenmiş ve stabilite ile manevra kabiliyetini artıracak şekilde optimize edilmiştir. Ana gövde, çoklu bacak hareketleri sırasında dengeyi koruyacak biçimde yapılandırılmıştır. Tüm bileşenler rijit bağlantılarla entegre edilerek yapısal dayanıklılık sağlanmıştır. Hafifliği ve yeterli mukavemeti nedeniyle PLA malzeme tercih edilmiş; bu sayede motor yükü azaltılmış ve enerji verimliliği artırılmıştır. Prototip üretimde kullanılan bu yapı, özellikle enkaz altı arama kurtarma senaryoları için tasarlanmıştır. Robotun CAD modeli Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1: SolidWorks’te tasarlanan robotun modeli

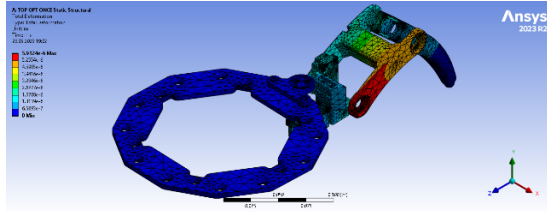
III. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Örümcek robotun bacak eklemleri ve ana gövdesi üzerindeki statik ve dinamik yükler, çeşitli operasyonel senaryolar (örneğin engebeli arazide yürüyüş, tırmanma, yük taşıma) dikkate alınarak sonlu elemanlar analizi (SEA) ile incelenmiştir. Analizlerde, özellikle bacak segmentleri ve eklemlerindeki gerinim dağılımları ile sistemin toplam deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Sınır koşulları; zemin temas noktaları, aktüatör bağlantıları ve gövde üzerindeki yük senaryoları baz alınarak gerçekçi şekilde tanımlanmış, analizlerin doğruluğu güvence altına alınmıştır. Uygulanan bu koşullar Şekil 2’de gösterilmektedir.

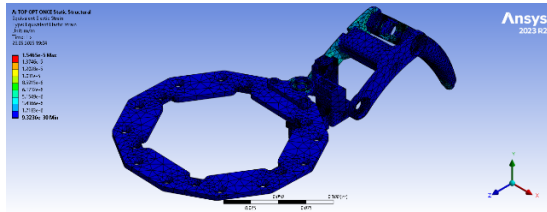


Şekil 2: Tasarıma uygulanmış sınır koşulları

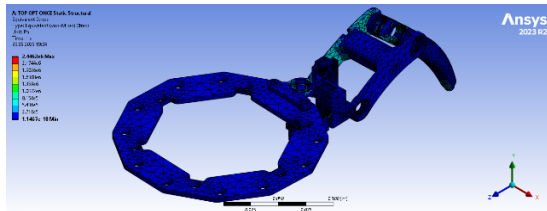
Bu sınır koşulları uygulandıktan sonra toplam deformasyon, gerinim ve gerilme sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te sunulmuştur.



Şekil 3: Toplam deformasyon miktarı

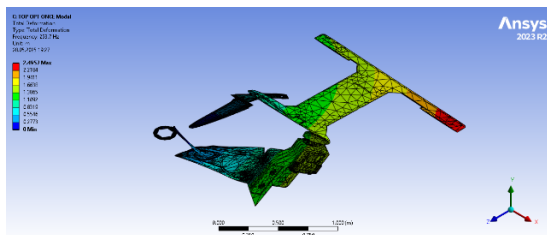


Şekil 4: Robot modelindeki gerinim dağılımı



Şekil 5: Robot modelindeki gerilim dağılımı

Robotun titreşim davranışını ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla modal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizle, bileşenlerin doğal frekansları ve titreşim modları belirlenerek, motorlar ve diğer dinamik yüklerden kaynaklanan etkiler incelenmiştir. Elde edilen veriler, robotun mekanik stabilitesini artırmak ve tasarımı optimize etmek açısından yol gösterici olmuştur. Ayrıca, titreşim seviyeleri ve frekans tepkilerinin robotun işlevselliğine etkileri değerlendirilmiş, bu sayede iyileştirme alanları netleşmiştir. Birinci moda ait deformasyon sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır.



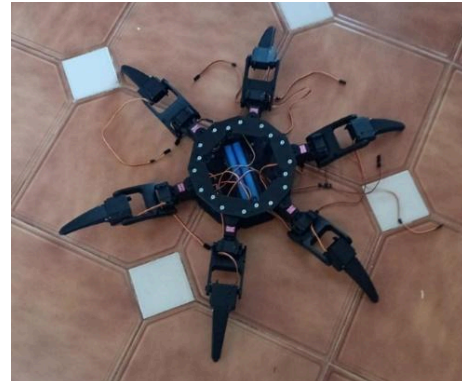
Şekil 6: Robot modelinin birinci mod şekli ve ilgili doğal frekansı

Sonuç olarak, modal analizde altı farklı mod ve bunlara karşılık gelen frekans-deformasyon değerleri elde edilmiştir. Bu veriler, robotun titreşim davranışının anlaşılması ve yapısal iyileştirmelere yön verilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Detaylı sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Doğal frekanslar ve deformasyonlar ile modal analiz sonuçları

Mod	Frekans(Hz)	Deformasyon(m)
1	253,7	2,4957
2	269,92	2,4951
3	353,58	2,3546
4	411,2	2,5018
5	574,95	3,6239
6	954,49	2,883

Topoloji optimizasyonu ile gereksiz kütle azaltılarak yalnızca gerekli malzeme kullanılmış, böylece hem mukavemet korunmuş hem de üretim verimliliği ve performans artışı sağlanmıştır. Elde edilen yapı, mekanik avantajların yanı sıra maliyet ve enerji tasarrufu da sunmaktadır. Optimizasyon öncesi ve sonrası görseller Şekil 7 ve Şekil 8'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

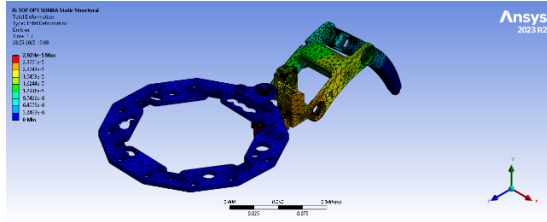


Şekil 8: Topoloji optimizasyonundan önce robot modeli

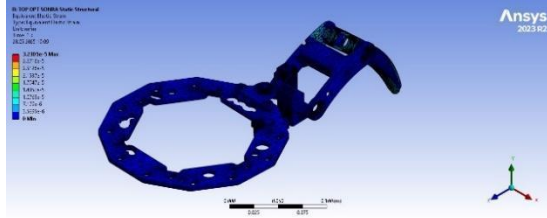


Şekil 9: Topoloji optimizasyonundan sonra robot modeli

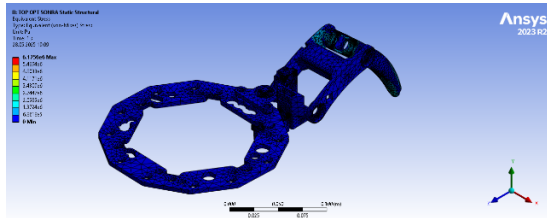
Optimizasyon sonrası modelin mekanik performansı çeşitli analizlerle değerlendirilmiştir. Toplam deformasyon, gerilme ve gerinim dağılımları sırasıyla Şekil 10, 11 ve 12'de sunulmuştur. Bu görseller, optimizasyonun yapısal dayanım üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, tasarım sürecindeki gelişmeleri mühendislik açısından görselleştirmektedir.



Şekil 10: Topoloji optimizasyonu sonrası toplam deformasyon sonuçları



Şekil 11. Topoloji optimizasyonundan sonra stres dağılımı



Şekil 12. Topoloji optimizasyonundan sonra gerilme dağılımı

Tablo 2: Deformasyonların Karşılaştırılması

Mod	Topoloji Öncesi Deformasyon	Topoloji Sonrası Deformasyon
Static Strain	1.56e-5	3.23e-5
Stress	2.44e5	6,17e6
Total Dofarmation	5.012e-6	2,92e-5

IV. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, enkaz gibi yapılandırılmamış alanlarda görev yapabilecek çok bacaklı bir örümcek robotun konsept tasarımı, hareket kontrol stratejileri ve prototip geliştirme potansiyeli ele alınmıştır. Biyomimetik prensiplere dayanan çok serbestlik dereceli bacak yapısı ve merkezi kontrol birimi sayesinde, robotun zorlu arazilerde dengeli ve çevik hareket etmesi hedeflenmiştir.

Geliştirme sürecinde, gövde ve bacaklarda ağırlığı azaltmak ve dayanımı artırmak amacıyla SEA ve topoloji optimizasyonu teknikleri uygulanmıştır. Ön analizler, belirli yükleme senaryolarında malzeme etkinliğinin artırılarak yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermiştir. Statik ve modal analiz sonuçları ise sistemin deformasyon ve titreşim performansının saha koşullarına uygun olduğunu doğrulamıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen robot konsepti; otonom, modüler ve uyarlanabilir yapısıyla arama, tespit ve destek görevlerinde kullanılabilecek bir platform sunmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] Singh, M., & Khan, S. A. L. A. (2024). Advances in Autonomous Robotics: Integrating AI and Machine Learning for Enhanced Automation and Control in Industrial Applications. International Journal for Multidimensional Research Perspectives, 2(4), 74-90.
- [2] Subaranjani, T., Jaideep, R., Manjula, C., & Seema, V. (2024, February). Integrating Photonics and Fiber Bragg Grating Sensors with Deep Reinforcement Learning for Advanced Robotic Systems. In 2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom) (pp. 283-289). IEEE.
- [3] Yang, G. Z., & McNutt, M. (2016). Robotics takes off. Science, 352(6291), 1255-1255.
- [4] Agrawal, A., Soni, R., Gupta, D., & Dubey, G. (2024). The role of robotics in medical science: Advancements, applications, and future directions. Journal of Autonomous Intelligence, 7(3), 1-27.
- [5] Mae, Y., Mure, T., Inoue, K., Arai, T., & Koyachi, N. (2006). Sensor-based walking on rough terrain for legged robots. Field and Service Robotics: Recent Advances in Research and Applications, 255-264.
- [6] Seidel, D., Hermann, M., Gumpert, T., Loeffl, F. C., & Albu-Schäffer, A. (2020, March). Using elastically actuated legged robots in rough terrain: Experiments with dlr quadruped bert. In 2020 IEEE Aerospace Conference (pp. 1-8). IEEE.
- [7] Silvino, J. L., Martins-Filho, L. S., Resende, P., & Pizziolo, T. A. (2007). Simplified Modelling of Legs Dynamics on Quadruped Robots' Force Control Approach. INTECH Open Access Publisher.
- [8] Chai, X., Gao, F., & Xu, Y. (2017). Perception-based gait planning for a hexapod robot walking on typical structured terrain. In Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016 (pp. 169-181). Springer Singapore.
- [9] Chai, X., Gao, F., & Xu, Y. (2017). Perception-based gait planning for a hexapod robot walking on typical structured terrain. In Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016 (pp. 169-181). Springer Singapore.
- [10] Cherlet, S. (2015). Developing an autonomous hexapod robot for.
- [11] Colombano, S. P., Kirchner, F., Spenneberg, D., Starman, J., Hanratty, J., & Kovsmeyer, D. (2003, January). Cooperative exploration of rough Martian terrains with the "Scorpion" legged robot as an adjunct to a rover. In Mars Soc Conference.
- [12] Lindqvist, B., Karlsson, S., Koval, A., Tevetzidis, I., Haluška, J., Kanellakis, C., ... & Nikolakopoulos, G. (2022). Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue. Robotics and Autonomous Systems, 154, 104134.
- [13] Stańczyk, B., & Awrejcewicz, J. (2015). Six-legged robot gait analysis. Nonlinear Dynamics and Systems Theory, 15(1), 63-72. Sharath, H. K., & Shivashankar, B. S. (2013). Book handling robot for libraries. International Journal of Engineering Research Technology (IJERT), 2(8).
- [14] Luo, Z. W., Odashima, T., Asano, F., & Hosoe, S. On Recent Bio-mimetic Studies of Legged Locomotion.
- [15] Espinal, A., Rostro-Gonzalez, H., Carpio, M., Guerra-Hernandez, E. I., Ornelas-Rodriguez, M.,

- Puga-Soberanes, H. J., ... & Melin, P. (2016). Quadrupedal Robot Locomotion. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 8.
- [16] Zhang, C., Jiang, X., Teng, M., & Teng, J. (2015, December). Research on gait planning and static stability of hexapod walking robot. In *2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* (Vol. 2, pp. 176-179). IEEE.
- [17] Duan, X., Chen, W., Yu, S., & Liu, J. (2009, December). Tripod gaits planning and kinematics analysis of a hexapod robot. In *2009 IEEE International Conference on Control and Automation* (pp. 1850-1855). IEEE.
- [18] Kaneko, M., Abe, M., & Tanie, K. (1985). A hexapod walking machine with decoupled freedoms. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1(4), 183-190.
- [19] Jianhua, G. (2006, December). Design and kinematic simulation for Six-DOF leg mechanism of hexapod robot. In *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 625-629). IEEE.
- [20] Žák, M., Rozman, J., & Zbořil, F. V. (2021). Design and control of 7-dof omni-directional hexapod robot. *Open Computer Science*, 11(1), 80-89.
- [21] Davliakos, I., Roditis, I., Lika, K., Breki, C. M., & Papadopoulos, E. (2018). Design, development, and control of a tough electrohydraulic hexapod robot for subsea operations. *Advanced Robotics*, 32(9), 477-499.
- [22] Xu, K., Qin, R., Chen, C., Dong, G., Chen, J., & Ding, X. (2024). Design and multimodal locomotion plan of a hexapod robot with improved knee joints. *Journal of Field Robotics*, 41(5), 1279-1296.
- [23] Ayad, M., Boating, K., & Zhang, W. (2022, July). Implementation of a balanced and fluid movement six-legged spider robot. In *Science and Information Conference* (pp. 868-881). Cham: Springer International Publishing.
- [24] Gökrem, L., Can, M. S., & Aydın, S. (2020). Hexapod Robot Design and Performance Comparison of Fuzzy and PID Control Methods. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(1), 88-97.
- [25] Uddin, M. I., Alamgir, M. S., Chakrabarty, J., Hossain, M. I., & Samy, M. A. A. (2019, November). Multitasking spider hexapod robot. In *2019 IEEE international conference on robotics, automation, artificial-intelligence and internet-of-things (RAAICON)* (pp. 135-140). IEEE.

İnşaat Sektöründe Çalışan İşçilerin İş Güvenliğini Artırmaya Yönelik Bir Bileklik Geliştirilmesi

Hidayet Aydın, Berat Berkay Abakay, Kasım Serbest

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, inşaat sektöründe sıkça yaşanan iş kazalarının etkilerini en aza indirmek amacıyla geliştirilen “WristGuard” adlı akıllı bir bileklik tasarımı kapsamaktadır. Bileklik, kalp atış hızı, vücut sıcaklığı ve düşme gibi kritik sağlık verilerini çeşitli sensörler aracılığıyla sürekli izleyerek anlık olarak iş sağlığı uzmanlarına bildirim gönderebilir. Sistem, Wi-Fi üzerinden veri aktarımı, GPS ile konum takibi ve NFC etiketi ile tıbbi verilerin hızlı erişimi gibi fonksiyonları entegre biçimde sunmaktadır. Geliştirilen prototipin düşük maliyetli, uzun ömürlü ve zorlu saha koşullarına dayanıklı olması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, donanım seçimi, yazılım tasarımı, kullanıcı arayüzü ve sistem entegrasyonu gibi aşamalar açıklanmakta; cihazın iş güvenliği alanında sunabileceği potansiyel katkılar değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İş Güvenliği, Sensör, Akıllı Bileklik, İnşaat Teknolojisi, Mekatronik.

I. GİRİŞ

İnşaat sektörü, barındırdığı fiziksel riskler ve çalışma ortamının doğası gereği, iş sağlığı ve güvenliği açısından en hassas sektörlerden biridir. Bu alanda çalışan işçilerin, yüksekte düşme, ağır ekipmanla çalışma, elektrik çarpması, aşırı yorgunluk ve dikkat dağınıklığı gibi birçok faktöre bağlı olarak ciddi iş kazalarına maruz kaldıkları bilinmektedir [1].

Geleneksel güvenlik önlemleri genellikle iş kazası meydana geldikten sonra devreye girmektedir [2]. Oysa ki kaza anında yapılacak hızlı ve bilinçli müdahale, işçinin hayatta kalması ve kalıcı hasar riskinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, özellikle son yıllarda gelişen giyilebilir teknoloji uygulamaları sayesinde, işçilerin sağlık verilerinin anlık izlenmesi ve veri temelli kararlar alınması mümkün hâle gelmiştir [3]. Kalp atışı, vücut sıcaklığı, hareket takibi gibi temel biyometrik ölçümlerin taşınabilir sensörler aracılığıyla elde edilip analiz edilmesi; tehlikeli durumları önceden haber vermeye ve acil durumlarda müdahaleyi hızlandırmaya olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda sunulan “WristGuard” adlı akıllı bileklik fikri, özellikle inşaat şantiyelerinde görev yapan beden işçilerine yönelik olarak geliştirilmiştir. Bileklik, kalp atış hızı, vücut sıcaklığı ve düşme gibi kritik sağlık parametrelerini gerçek zamanlı olarak izlemekte; bu verileri Wi-Fi bağlantısı aracılığıyla merkeze iletmektedir. Ayrıca GPS modülü sayesinde işçinin konumu hassas biçimde tespit edilmekte ve NFC etiketiyle sağlık çalışanlarının kazazedeye ait kritik tıbbi bilgilere anında erişmesi sağlanmaktadır. Cihaz, aynı zamanda acil durumlar için fiziksel bir SOS butonu da içermektedir.

Çalışmanın amacı yalnızca bireysel işçilerin güvenliğini artırmak değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği profesyonellerine merkezi bir izleme ve müdahale olanağı sunmaktır. Geliştirilen sistem, hem donanım hem de yazılım boyutuyla bütünlüklü bir çözüm sunmakta, düşük maliyetli ve geniş ölçekte uygulanabilir olmasıyla da sektörel yaygınlık potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışmada, WristGuard sisteminin tasarımı, bileşen seçimi, yazılım geliştirme süreci, saha testleri ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Bu bağlamda geliştirilecek prototipin, ülkemizde ve dünyada inşaat sektörüne yönelik iş güvenliği uygulamalarına önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir.

II. BİLEŞEN SEÇİMİ VE SİSTEM ENTEGRASYONU

Bu çalışmada geliştirilen WristGuard akıllı bilekliği, donanım ve yazılım sistemlerinin entegre biçimde çalıştığı, çok modüllü bir mekatronik yapıdır. Çalışma yöntemi dört ana aşamadan oluşmaktadır: ihtiyaç analizi, donanım-yazılım tasarımı, prototipleme ve test süreçleri.

İhtiyaç ve Teknoloji Analizi

Çalışma öncesinde iş güvenliği uzmanları ve sektör çalışanlarıyla yapılan görüşmeler neticesinde, gerçek zamanlı sağlık takibi ve acil durum bildirimi gibi ihtiyaçlar önceliklendirilmiştir. Literatür taraması ile mevcut teknolojiler incelenmiş, piyasada yer alan ticari akıllı bilekliklerin çoğunun bu ihtiyaçları karşılamada yetersiz olduğu belirlenmiştir [4].

Donanım Bileşenleri ve Sensörler

Sistem, aşağıda belirtilen temel donanım bileşenlerinden oluşmaktadır:

PPG Sensörü: Kalp atış hızının izlenmesi için.

IR Termometre: Vücut sıcaklığını temassız şekilde ölçmek için.

İvmeölçer (Accelerometer): Düşme algılaması için.

Neo-6M GPS Modülü: İşçinin konumunun hassas olarak belirlenmesi için.

NFC Etiket (NTAG213): Tıbbi bilgilerin hızlı erişimi için.

ESP32 Wi-Fi Modülü: Verilerin merkeze kablosuz aktarımı için.

Li-Po Batarya: Uzun süreli kullanım ve enerji verimliliği sağlamak amacıyla.

Sensörlerin boyut, enerji tüketimi, dayanıklılık ve doğruluk gibi kriterleri göz önünde bulundurularak seçimleri yapılmıştır. Malzeme temininde hem maliyet etkinliği hem de saha uygunluğu dikkate alınmıştır.

Yazılım ve Arayüz Tasarımı

Sistem arayüzü, iş güvenliği uzmanlarının sensör verilerini kolayca okuyabileceği sade bir yapıya sahiptir. Arayüzde; işçinin adı, anlık kalp atışı, vücut sıcaklığı, konumu ve uyarı geçmiş gibi bilgiler yer almaktadır. Acil bir durumda sistem otomatik olarak uyarı üretmekte, aynı zamanda işçinin kendisinin kullanabileceği bir SOS butonu da bulunmaktadır.

Prototipleme ve Kordon Tasarımı

Tüm elektronik bileşenler, esnek yapıda olan TPU malzemesi kullanılarak 3D yazıcıda basılan bir bileklik gövdesine entegre edilmiştir. Kordon tasarımı, farklı bilek kalınlıklarına uyum sağlayacak şekilde ayarlanabilir formda tasarlanmıştır. Prototip, hem kullanım kolaylığı hem de fiziksel dayanıklılık testlerinden geçirilmiştir.

Test Süreci ve Veri Aktarımı

Bileklik testleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

Laboratuvar ortamında fonksiyon testi: Sensörlerin veri doğruluğu ve iletişim protokolü test edilmiştir.

Saha simülasyonu: Kullanıcının düşme, ateş yükselmesi veya nabız değişimi gibi senaryolarda sistemin uyarı verme başarımı ölçülmüştür.

Wi-Fi üzerinden yapılan veri aktarımında ESP32 modülü kullanılarak 5–8 saniyelik aralıklarla sunucuya bilgi gönderilmiştir. Kritik durumda anlık alarm tetiklenmesi sağlanmıştır.

III. DONANIM VE FONKSİYONEL BİLEŞENLER

WristGuard akıllı bilekliği, zorlu şantiye koşullarına uygun olarak geliştirilen modüler bir sistemdir. Donanım bileşenleri dikkatle seçilerek düşük güç tüketimi, yüksek veri doğruluğu ve saha dayanıklılığı öncelikli kriterler olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde yazılım bileşenleri de gerçek zamanlı izleme, uyarı sistemi ve kolay erişilebilirlik üzerine kurgulanmıştır.

Donanım Tasarımı

Bileklik gövdesi, TPU (Termoplastik Poliüretan) filament kullanılarak 3D yazıcıda basılmıştır. Bu malzeme hem esnek hem de toz ve suya dayanıklı olduğundan inşaat sahaları için idealdir. Sistem, aşağıdaki donanım bileşenlerinden oluşmaktadır:

PPG Sensör (Photoplethysmography): Nabız ölçümü için kullanılır. Ani nabız değişimlerinde alarm tetikler.

IR Termometre: Vücut sıcaklığını temassız biçimde ölçer. Belirlenen eşik değerin üzerine çıktığında sistem uyarı verir.

İvmeölçer: Üç eksenli hareket takibi sayesinde düşme tespitinde bulunur.

Neo-6M GPS Modülü: İşçinin konumunu bina, kat ve ofis uzaklığı şeklinde takip eder.

NTAG213 NFC Etiketi: İşçinin önceden kaydedilen tıbbi verilerinin hızlıca erişilmesini sağlar.

ESP32 Wi-Fi Modülü: Verilerin anlık olarak merkez sunucuya iletilmesini sağlar.

Li-Po Batarya: Ortalama 10 saatlik kesintisiz kullanım sağlar.

Yazılım Geliştirme

Yazılım bileşeni; mikrodenetleyici üzerinde çalışan algoritmalar, kullanıcı arayüzü ve veri aktarım altyapısını kapsar:

Veri Okuma ve Filtreleme: Her bir sensörden gelen veriler mikrodenetleyici (ESP32) üzerinde işlenir, filtrelenir ve eşik değerlerle karşılaştırılır.

Alarm Mekanizması: Ani düşüş, yüksek ateş veya anormal kalp atış verisi algılandığında sistem otomatik olarak “acil durum” bildirimi oluşturur.

Wi-Fi Haberleşme Protokolü: Veriler 5–8 saniyelik aralıklarla merkezi bir sunucuya gönderilir. Veri yükü azaltılarak enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Mobil ve PC Arayüzü: Figma ile tasarlanan sade kullanıcı arayüzü, verileri gerçek zamanlı gösterir. Uzmanlar bu verileri ofisten veya mobil cihazlarından takip edebilir.

Kayıt ve Güncelleme Sistemi: NFC etiketi aracılığıyla kullanıcının tıbbi bilgileri güncellenebilir. Sistem, sadece yetkili personelin bu güncellemeleri yapmasına izin verecek şekilde yapılandırılmıştır.

Donanım ve yazılım entegrasyonu tamamlandıktan sonra sistem, çeşitli senaryolarla test edilmiş ve gerçek koşullarda çalışabilirliği doğrulanmıştır. Sistemin genişletilebilir yapısı sayesinde yeni sensörler veya iletişim modülleri eklenmesi de mümkündür.



Şekil 1: Geliştirilen ürünün kullanıcı arayüzü ve sahada kullanımına ait temsili görseller.

IV. UYGULAMA POTANSİYELİ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

WristGuard projesi kapsamında geliştirilen akıllı bileklik sistemi, inşaat sektöründe iş güvenliğine yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Giyilebilir sensör teknolojileri, kablosuz veri iletimi, konum takibi ve kişiye özel tıbbi veri erişimi gibi bileşenlerin entegre edilmesiyle, sadece bir uyarı

sistemi değil; aynı zamanda kapsamlı bir sağlık izleme ve acil müdahale aracı oluşturulmuştur.

Projenin sonunda elde edilen prototipin, gerçek zamanlı veri toplama, işlenmiş bilginin kullanıcı dostu arayüzler üzerinden görüntülenmesi ve acil durum bildirimi gibi temel işlevleri başarıyla gerçekleştirmesi hedeflenmektedir.. Bileklik aracılığıyla toplanan kalp atış hızı, vücut sıcaklığı ve konum bilgileri; olası bir kaza durumunda iş güvenliği uzmanları ve sağlık ekiplerine kritik bilgiler sağlanacaktır. Özellikle NFC etiketi ile kazazedinin tıbbi verilerine anında erişim, ilk müdahale süresinde büyük avantaj sunmaktadır.

Yapılacak testlerle bileklik, düşme algılama ve anormal sağlık verilerini tespit etme konusunda tatmin edici bir doğruluk oranına ulaşacaktır. Geliştirilen sistemin kullanıcı deneyimi açısından ergonomik ve sade bir yapıya sahip olması, pratik kullanım açısından olumlu geri bildirimlerle desteklenecektir..

Bu çalışmayla birlikte; düşük maliyetli, enerji verimli, genişletilebilir ve mobil uyumlu bir iş sağlığı çözümünün, özellikle tehlikeli sektörlerde insan hayatını koruma açısından ne denli önemli bir fark yaratabileceği görülmüştür [5]. İlerleyen dönemlerde sistemin Bluetooth entegrasyonu, mobil uygulama geliştirme, yapay zekâ destekli anomali tespiti gibi yönlerle genişletilmesi planlanmaktadır.

WristGuard'ın, sadece Türkiye'de değil, benzer risklerin yaşandığı tüm ülkelerde yaygınlaşabilecek bir iş güvenliği aracı olma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir [6].

Tablo 1: Doç. Dr. M. Uğur Müngen tarafından yazılan “İnşaat Sektörümüzdeki Başlıca İş Kazası Tipleri” (TMH - 469 - 2011/5)

Yıl	Toplam Sayı		Sürekli İş Göremezlik		Ölüm	
	Türkiye Genel i	İnşaat Sektörü	Türkiye Genel i	İnşaat Sektörü	Türkiye Genel i	İnşaat Sektörü
2005	73923	6480	1374	322	1072	290
2006	79027	7143	1953	425	1592	397
2007	80602	7615	1550	359	1043	359
2008	72963	5574	1452	373	886	297
2009	64316	6891	1168	282	1171	156
Ort.	74166	6441	1599	352	1153	300

V. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında geliştirilen WristGuard akıllı bileklik prototipi, inşaat sektöründe çalışan işçilerin iş güvenliğini artırmaya yönelik bütünlük bir çözüm olarak tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen laboratuvar ve saha testleri ile birlikte sistemin kalp atış hızı, vücut sıcaklığı ve düşme gibi hayati verileri başarıyla algılayıp merkeze iletebilecektir. GPS modülü sayesinde işçinin konumu

anlık olarak belirlenecek; NFC etiketi ile de kazazedinin tıbbi bilgilerine hızlı erişim sağlanabilecektir..

Test sonuçları için:

Düşme algılama doğruluğu: %90+
Anormal kalp atış hızı tespiti: %85+
Yüksek vücut sıcaklığı uyarı doğruluğu: %90+
Veri aktarım süresi: Ortalama 5–8 saniye

Gibi yüksek ve tıbbi açıdan koruma sağlayabilecek doğrulukta veriler beklenmektedir.

Kullanıcı deneyimi açısından, bilekliğin ergonomik yapısı ve sade arayüzü sayesinde panik anında oluşabilecek dikkat dağınıklıklarını minimize etmek hedeflenmektedir. Prototipin düşük maliyetli, taşınabilir ve enerji verimli oluşu, sistemin saha koşullarına uygunluğunu beklenmektedir [7].

Sonuç olarak, WristGuard bilekliği; hem bireysel işçi sağlığı açısından önemli bir önlem aracı olmuş, hem de iş sağlığı ve güvenliği uzmanlarına merkezi bir gözlem ve müdahale imkânı sunarak sektöre değer katacak nitelikte bir yenilik ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalarda cihazın Bluetooth uyumluluğu, mobil uygulama desteği ve yapay zekâ tabanlı anomali tespiti ile daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu proje, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen “2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı” tarafından desteklenmiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Müngen, M. U. (2011). *İnşaat sektörümüzdeki başlıca iş kazası tipleri*. TMH, 469(2011/5). <https://izmir.imo.org.tr/Eklenti/585.insaat-sektorumuzdeki-baslica-is-kazasi-tipleripdf.pdf>
- [2] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (n.d.). *İş kazaları*. <https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/sektor-hakkinda/is-kazalari/>
- [3] Güllüoğlu, E. N., & Güllüoğlu, A. (2019). *Türkiye’de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analizi*. <https://www.researchgate.net/publication/338235460>
- [4] Akboğa, Ö., & Baradan, S. (2018). *İnşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarının karakteristiklerinin incelenmesi: İzmir alan çalışması*. Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/17611_42_57.pdf
- [5] Çavuş, A. (2016). *Türkiye’de inşaat sektöründeki iş kazalarının sınıflandırılarak nedenlerinin incelenmesi*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/apjes/issue/24322/257738>
- [6] Othman, N., & Saleh, R. A. (2022). *Overview of the causes of accident in construction industry: A comparative perspectives*. <https://www.researchgate.net/publication/366018033>
- [7] Çavuş, A., & Taçgın, E. (2016). *Türkiye’de inşaat sektöründeki iş kazalarının sınıflandırılarak nedenlerinin incelenmesi*. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/22412>

Değiştirilebilir Platformlu Rover Araç

Dişar Can Aydın, Halil Aktoz, Berin Özdağıç, Arif Solmaz

İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, çok amaçlı kullanım senaryolarına uyum sağlayabilen, modüler yapıda bir rover araç tasarımı ve geliştirilmesi ele alınmıştır. Geliştirilen sistem; arazi keşfi, çevresel veri toplama, mahsul analizi ve tarımsal ürünlerin toplanması gibi görevleri yerine getirebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Tasarım süreci; robot kolları, görüntü işleme algoritmaları, sensör tabanlı veri analizi ve modüler mekanik-elektronik yapılar üzerine yapılan kapsamlı literatür taramalarıyla temellendirilmiştir. Sistem geliştirme süreci, elde edilen akademik ve deneysel veriler doğrultusunda özgülleştirilmiş; prototip üretimi sonrası gerçekleştirilen saha testleri ile sistem performansı değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, sadece mekanik yapı değil, elektronik devreler, yazılım altyapısı ve görev modülleri de geri bildirimler doğrultusunda sürekli olarak optimize edilmiştir. Kullanılan sensör ve modüller görev bazlı olarak çeşitlendirilmiştir: arazi analizi için gaz sensörleri, kamera, robot kol ve aydınlatma sistemleri; tarımsal uygulamalar için ise nem ve sıcaklık sensörleri ile otonom destekli robotik kollar entegre edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma farklı operasyonel ihtiyaçlara cevap verebilen, yeniden yapılandırılabilir modüllere sahip, sahada etkin görev icra edebilen otonom bir robotik platform geliştirilmesini hedeflemektedir. Sistem, çok disiplinli bir yaklaşımla tasarlanmış olup, tarım teknolojileri ve keşif robotları gibi çeşitli alanlara katkı sağlayacak potansiyele sahiptir.

Anahtar kelimeler: Modüler Rover, Robot Kol, Arazi Keşfi, Tarımsal Otomasyon.

I. GİRİŞ

Robotik sistemler, farklı sektörlerde artan ihtiyaçlara cevap verebilmek adına günümüzde yoğun bir şekilde geliştirilmektedir. Özellikle keşif, afet yönetimi, tarım, mayın tespiti ve arama-kurtarma gibi insan sağlığı açısından riskli veya ulaşılması güç alanlarda robotik çözümler kritik bir rol oynamaktadır. Bu gibi durumlarda, insan gücünün yetersiz kaldığı veya sürekli iş gücü gerektiren ortamlarda robotlar güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Literatürde modüler mobil robotların endüstri, uzay, sağlık ve kurtarma gibi pek çok sektörde farklı görevleri yerine getirebilmek için yeniden yapılandırılabilirliği ve giderek önemli hale geldiği vurgulanmaktadır [1].

Bu proje kapsamında, çok yönlü ve görev odaklı modüler bir robotik sistemin tasarımı ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Projenin en özgün yönlerinden biri, taşıyıcı rover aracın modüler bir yapıya sahip olmasıdır. Bu sayede sistem, farklı görev tanımlarına uygun olarak kolayca yeniden konfigüre edilebilir; bu esneklik hem araştırma hem de uygulama sahalarında geniş bir kullanım potansiyeli sağlamaktadır. Modüler yaklaşım aynı zamanda bakım ve iyileştirme süreçlerini de kolaylaştırmaktadır. Sistem üzerindeki 5 eksenli robot kol, platforma işlevsel esneklik kazandıran temel bileşenlerden biridir. Bu robot kol sayesinde çevreden numune toplama, nesne manipülasyonu ve çeşitli saha görevlerinin yerine getirilmesi mümkün hale gelmektedir. Robot kolun yapısı, modüler tasarıma uyumlu olacak şekilde özelleştirilebilir olup farklı modül ve sensörlerle entegre çalışabilecek biçimde tasarlanmıştır. Nitekim literatürde de arazi veya tarım gibi alanlarda gezinim platformuna entegre robot kolların, ortamdan veri toplama ve müdahale etme kabiliyetini önemli ölçüde artırdığı gösterilmektedir [2].

Bu doğrultuda, geliştirilen Modüler Rover Aracı, birden fazla alanda görev yapabilen yenilikçi ve pratik bir robotik çözüm olarak tasarlanmıştır.

II. TASARIM VE GELİŞTİRME SÜRECİ

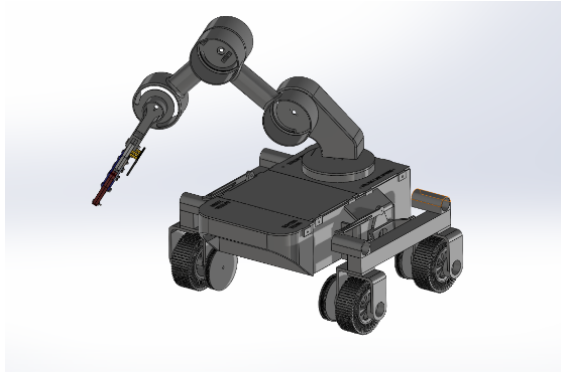
II.1. Mekanik Tasarım ve Üretim

Robot kol ve rover araç gövdesinin parçaları Autodesk Inventor [6] yazılımı ile modellenmiş, ardından tüm alt sistemler SolidWorks [7] ortamına aktararak bir arada montaj modeli oluşturulmuştur. SolidWorks [7] üzerinde yürütülen simülasyon ve analizlerle, robot kol ile rover araç entegrasyonu optimize edilmiş; saha koşullarına uygunluk, mekanik dayanıklılık ve işlevsellik kriterleri değerlendirilerek tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır. Örneğin, arazi şartlarında ortaya çıkabilecek titreşim ve yükler göz önünde bulundurularak şasi yapısı güçlendirilmiş, ağırlık merkezi ve denge hesapları gerçekleştirilmiştir.

Tasarım onayının ardından üretim aşamasına geçilmiştir. Mekanik parçaların prototip imalatı için Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisi kullanan "3 Boyutlu" yazıcılar tercih edilmiştir. Seçilen malzeme ile gövde, kol eklemleri ve tekerlek bağlantı parçaları gibi bileşenler katmanlı imalat tekniğiyle üretilmiştir. Baskı parametreleri, parçaların mekanik dayanımını artıracak şekilde optimize edilmiştir. Montaj sırasında tespit edilen ufak çaplı hatalar yine 3 boyutlu baskı ile yenilenerek hızlıca giderilmiştir. Bu hızlı prototipleme döngüsü sayesinde tasarım, imalat ve test süreçleri etkin bir şekilde yürütülmüştür. Nitekim günümüzde pek çok robotik platform neredeyse tamamen 3 boyutlu basılmış parçalardan oluşacak şekilde prototipleşmektedir. Örneğin; Veter gezgin aracı veya dört bacaklı robot platformu gibi sistemlerin hemen hemen tüm mekanik aksamlarını ABS (Akrilonitril bütadien stiren) plastikten 3 boyutlu baskıyla üretilmiştir. Bu proje de benzer şekilde, eklemeli imalat yöntemlerinin sunduğu esneklikten yararlanarak karmaşık mekanik parçaların hızlı ve düşük maliyetli üretimini mümkün kılmıştır.[1]

Rover aracın yürüyen aksamı ve hareket kabiliyeti tasarlanırken 4 tekerlekten çekiş konsepti uygulanmıştır. Şasiye dört köşeden bağlanan birbirinden bağımsız DC motor tahrikli tekerleklerle araç hareket etmektedir. Her bir tekerlekte kullanılan 12 V motorlar, gömülü dişli kutuları sayesinde yaklaşık 1200 devir çıkış hızı ve yüksek tork sağlamaktadır. Dört motorlu sürüş sistemi sayesinde araç, diferansiyel direksiyon prensibiyle kendi eksenini etrafında dönebilecek 2 manevra yeteneğine kavuşmuştur. Zorlu arazi koşullarında tutunmayı artırmak için tekerlekler TPU (Termoplastik Poliüretan) filament seçilmiştir.

Robot kolun mekanik tasarımında hafiflik ve güç aktarımı arasındaki denge gözetilmiştir. Kolun eklemleri 5 serbestlik derecesine sahiptir ve insan kolunu andıran bir çalışma uzayına ulaşabilmektedir. Her eklemden hareket, uygun oranda dişli redüksiyonları ve kayış-kasnak mekanizmaları ile sağlanmıştır. Bu kayış-kasnak sistemi, motorların eklem noktalarından uzakta konumlandırılmasına imkân tanıyarak kolun uç kısımlarındaki kütleyi azaltmakta ve eklemlerin daha akıcı hareket etmesini sağlamaktadır. Eklem motorları olarak yüksek torka sahip servo motorlar kullanılmış; bu motorlar PWM (Pulse Width Modulation) sinyalleri ile hassas açısal konumlandırma yapabilmektedir. Sonuç olarak, mekanik tasarım süreci sonunda modüler rover aracının gövdesi, hareket mekanizması ve robot kolu bir prototip olarak başarıyla ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 4: Modüler Rover Araç Tasarım Görseli.

II.2. Elektronik Sistemler

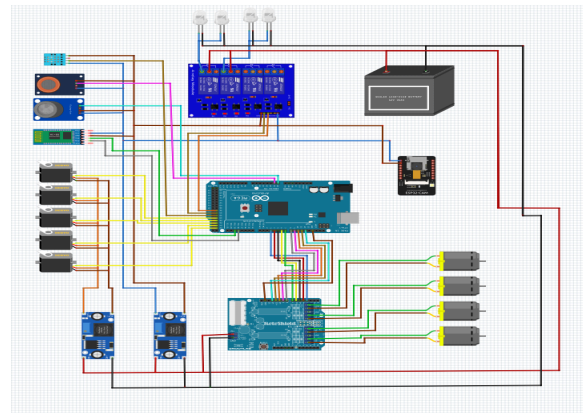
Modüler Rover aracın elektronik kontrol altyapısı hem gövde üzerindeki hareket sistemini hem de entegre modülleri yönetebilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin beyni olarak Arduino Mega mikrodenetleyici kartı seçilmiştir. 16-bit ARM tabanlı bir denetleyiciye sahip olan Arduino Mega, önceki Arduino modellerine kıyasla çok daha yüksek bir saat hızına (16 MHz) ve geniş Giriş/Çıkış pin kapasitesine sahiptir. Bu sayede Rover araç, robot kol ve çeşitli sensör modüllerinin eşzamanlı kontrolü bu tek kart üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca yüksek işlemci hızı, ileride eklenecek daha karmaşık algoritmalar (örneğin görüntü işleme) için de bir temel sağlamaktadır. Arduino platformunun açık kaynaklı ve kolay programlanabilir yapısı, projeye hızlı geliştirme imkânı sunmuştur. Nitekim Arduino basitliği, düşük maliyeti ve esnekliği sayesinde hobi, eğitim ve profesyonel pek çok robotik projesinde tercih edilmektedir [3].

Rover gövdesinin dört DC motorunun sürülmesi için H-köprüsü motor sürücülerini kullanılmıştır. Her iki motor çifti için birer L293B entegresi tercih edilerek ileri-geri

sürüş ve hız kontrolü (PWM ile) uygulanmıştır. L293B sürücüler, Arduino'dan gelen sinyaller ile 12 V 1200 devirlik motorları kontrol edecek şekilde devreye entegre edilmiştir. Motor sürücülerinin çıkış akım kapasitesi, kullanılan motorların nominal akım değerlerini karşılayacak şekildedir (her motor için ~2 A). Yön ve hız kontrolü, Arduino üzerinde yazılan programla gerçek zamanlı olarak sağlanmaktadır.

Sistemin enerji kaynağı olarak, Rover üzerinde taşınan şarj edilebilir bir Li-Po batarya paketi kullanılmıştır. Seçilen batarya 11.1V çıkış vermekte ve tüm sistem bileşenlerini beslemektedir. Farklı gerilim gereksinimleri olan bileşenler için batarya hattı üzerinde LM2596 gerilim regülatör modülleri kullanılarak 7.4 V ve 5 V gibi sabit çıkışlar elde edilmiştir. Bu regülatörler sayesinde Arduino kartı, sensörler ve sürücüler için kararlı bir güç dağıtımı sağlanmıştır.

Modüler sistemin çevresel algılamasını ve görev icrasını sağlayan sensörler; Gaz sensörleri olarak MQ-135 ve MQ-5 kullanılmıştır. MQ-135, ortamdaki hava kalitesini ve zararlı gazları (örneğin CO₂, benzen, duman) tespit edebilen bir sensördür; MQ-5 ise özellikle LPG gibi gazların varlığını algılamada kullanılır. Bu sensörler, arazi keşfi modülünde aracın bulunduğu ortamdaki 3 gaz kompozisyonunu sürekli izleyerek olası tehlikeli durumları tespit etmeye yarar. DHT-11 sıcaklık ve nem sensörü, tarımsal uygulama modülünde ortam sıcaklığı ve bağıl nem bilgisini sağlar. Bu veriler, özellikle sera veya tarla gibi ortamlarda bitki sağlığını etkileyen mikroklimatik koşulların izlenmesi açısından önemlidir. Sensörlerden gelen analog ve dijital sinyaller Arduino üzerindeki uygun girişlere bağlanmıştır.



Şekil 5: Modüler Rover Araç Elektronik Şeması [8]

Rover aracın uzaktan kontrolü ve veri iletimi, kablosuz haberleşme modülü ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Arduino'ya Bluetooth üzerinden bağlanabilen bir HC-05 modülü kullanılmıştır. HC-05, Rover ile harici cihaz (ör. Android telefon, Tablet) arasında çift yönlü seri iletişim kurarak kumanda sinyallerinin alınmasını ve sensör verilerinin gönderilmesini sağlar. Bluetooth modülü, Arduino UART portuna bağlanmış ve 115200 baud gibi uygun bir hızda haberleşecek şekilde yapılandırılmıştır. Bu sayede Rover, yakın mesafede (5-10 metre) kablosuz olarak kontrol edilebilmekte ve gerçek zamanlı veri aktarımı yapabilmektedir.

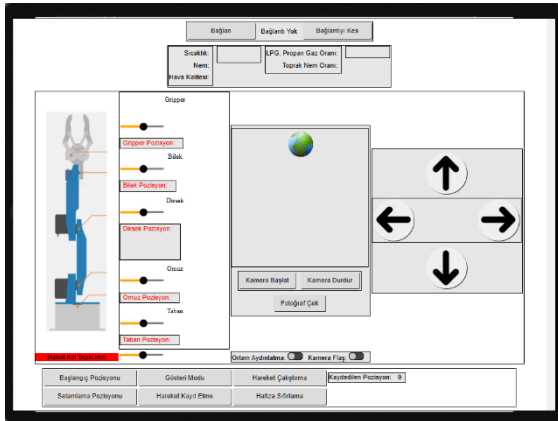
Kullanılan elektronik bileşenlerin güncel literatürde benzer projelerde de yer bulduğunu belirtmek gerekir. Örneğin, yakın tarihli bir yangın söndürme robotu çalışmasında, kontrol sistemi olarak Arduino Uno mikrodenetleyici, motor

sürücü olarak L293D entegresi ve kablosuz iletişim için Wi-Fi modülü kullanıldığı raporlanmıştır. Bizim sistemimiz de benzer şekilde Arduino tabanlı bir kontrolcü ile L293D sürücülerini entegre etmektedir. Bu benzerlik, seçilen elektronik mimarinin küçük ölçekli mobil robotlar için yaygın ve kullanışlı bir tercih olduğunu göstermektedir [4].

II. 3. Yazılım ve Kontrol

Geliştirilen Rover aracının yazılım ve kontrol sistemi hem dönme hareketlerini hem de robot kolunun işlevlerini kullanıcı kontrolü veya belirli senaryolara göre otonom olarak yönetebilmektedir. Ana kontrol yazılımı Arduino Mega üzerinde C/C++ tabanlı Arduino IDE kullanılarak geliştirilmiştir. Bu gömülü yazılım, sensör okumalarını gerçekleştirir, karar alma süreçlerini yönetir ve motor/servo kontrol sinyallerini üretir.

Platformun gerçek zamanlı kontrolü için bir Android mobil uygulama geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu mobil uygulama, Bluetooth haberleşmesi yoluyla Arduino ile sürekli bağlantı halinde çalışır. Uygulama arayüzü, kullanıcının robotu uzaktan kumanda etmesine ve sensör verilerini anlık olarak görüntülemesine imkân tanır. Arayüz üzerinde, rover aracın ileri/geri hareketi ve dönüş manevraları için bir sanal joystick veya ok butonları bulunmaktadır. Kullanıcı, bu kontrolleri kullanarak aracı sürerken aynı zamanda uygulama ekranında robotun ölçtüğü sensör değerlerini takip edebilir. Robot kolun kontrolü için mobil uygulamada ayrı bir bölüm yer almaktadır; burada 4 kolun her bir eklemi için ayrı kontrol düğmeleri veya bir slider arayüzü sağlanmıştır. Kullanıcı, omuz, dirsek, bilek eklemlerini kumanda ederek kolun istenen pozisyona gelmesini sağlayabilir ve uç efektörü açıp kapatabilir. Tüm bu komutlar, Bluetooth üzerinden Arduino'ya iletilir ve Arduino tarafından çözülerek ilgili motor sürücülerine veya servo çıkışlarına sinyal olarak gönderilir.



Şekil 6: Modüler Rover Araç Kontrol Uygulaması

Arduino üzerindeki kontrol yazılımı, basit otonom davranışlara da olanak tanıyacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu kapsamda, belirli görevleri yarı-otonom gerçekleştirecek senaryolar denenmiştir. Örneğin tarım modülünde, önceden tanımlı bir mahsul toplama senaryosu programlanmıştır. Bu senaryoda, kamera ile algılanan bir meyvenin konumuna göre robot kol belirli bir hareket dizisini (örneğin uzanma ve kavrama) otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Görüntü işleme, mevcut Arduino donanımının kısıtları nedeniyle, mobil uygulama tarafında veya harici bir bilgisayarda yapılacak şekilde planlanmıştır. Kamera modülünden gelen görüntüler mobil cihaz tarafından işlenip hedef nesnenin

(örneğin kırmızı bir elma) açısız ve mesafe bilgisi çıkarıldıktan sonra seri port üzerinden Arduino'ya iletilir. Arduino da bu bilgiye dayanarak robot kolu ilgili pozisyona hareket ettirir. Bu gibi ileri seviye işlemler henüz konsept kanıtı düzeyinde kalmaktadır.

Yazılım ve kontrol alanında karşılaşılan zorluklardan biri, çoklu görevin gerçek zamanlı yönetimidir. Arduino Mega, birden fazla sensör okuması ve motor kontrol işlemini zaman paylaşımı olarak yürütmektedir. Bu amaçla yazılım içinde kesmeler (interrupt) ve zamanlayıcılar kullanılarak görevler zaman dilimlerine bölünmüştür. Örneğin, belirli aralıklarla sensör değerleri okunurken, bu sırada sürekli döngü içinde Bluetooth iletişimi izlenmekte ve motor kontrolü akıcı şekilde devam ettirilmektedir. Bu çoklu görev yapısı, dikkatli bir kodlama ve geliştirme sonrasında kapsamlı testlerle optimize edilmiştir.

III. UYGULAMA ALANLARI VE MODÜLER YAPI

Geliştirilen rover aracının en büyük avantajı, modüler yapısı sayesinde birden çok uygulama alanında kullanılabilmesidir. Farklı sensör ve ekipman modülleri ekleyerek veya çıkararak, aynı temel platform ile bambaşka görevler yerine getirilebilir. Bu bölümde, sistemin özellikle odaklandığı iki ana uygulama senaryosu ve modüler yapının sağladığı esneklik açıklanmaktadır.

III. 1. Arazi Keşfi ve Çevresel Analiz

Modüler rover, doğal ortamların veya endüstriyel sahaların keşfi ve izlenmesi için bir arazi robotu olarak kullanılabilir. Bu senaryoda araca gaz sensörleri, kamera ve aydınlatma gibi modüler eklentiler takılarak çevresel veri toplama görevi icra edilmektedir. Örneğin, kimyasal sızıntı riski olan bir endüstri tesisinde rover, operatörün uzaktan yönlendirmesiyle içeride dolaştırılarak havadaki zararlı gaz seviyelerini ölçebilir. Üzerindeki MQ-135 ve MQ-5 sensörleri sayesinde ortamdaki tehlikeli gazların varlığını algılar ve elde ettiği verileri gerçek zamanlı olarak merkeze iletir. Aynı zamanda entegre kamera modülü aracılığıyla, keşif yapılan bölgenin görsel durumu da izlenebilir. Rover, düşük ışık koşullarında çalışmak üzere güçlü LED tabanlı aydınlatma projektörleriyle donatılmıştır; bu sayede karanlık ortamlarda veya gece görevlerinde de çevrenin görüntüsü kamerayla alınabilir.

Arazi keşif modülünde robot kol da kritik bir rol oynar. Örneğin, insan girişi için tehlikeli olabilecek bir bölgede rover, robot kolunu kullanarak yerden örnek alabilir bir nesneyi uzaktan incelemek üzere yakına getirebilir veya ufak engelleri kaldırabilir. Bu işlemler, operatörün mobil uygulama üzerinden verdiği komutlarla veya önceden tanımlanmış rutinlerle gerçekleştirilebilir. Sistem, bir yönetim senaryosunda da benzer şekilde değerlendirilebilir: Rover, deprem veya göçük alanlarında önden keşif yaparak gaz kaçağı, yangın riski gibi durumları sensörleriyle saptar; kamerasıyla enkaz altındaki yaralılara dair görsel bilgi aktarır; koluyla acil durum malzemesi (ilkyardım kiti vb.) ulaştırabilir. Tüm bu görevler için gereken farklı araçlar (termal kamera, gaz sensörü, hoparlör vb.) modüler olarak platforma entegre edilebilir. Modüler rover sistemi, uzaktan kumandayla çalıştığı için operatörler güvenli bir mesafede kalır ve böylelikle tehlikeli ortamlarda insan maruziyeti en aza indirilmiş olur [4].

III.2. Tarımsal İzleme ve Mahsul Toplama

Modüler Rover araç bir diğer önemli uygulama alanı, tarımsal robotik sistemlerdir. Tarım sektöründe özellikle tarımsal izleme konularında robotlara olan ilgi artmaktadır. Geliştirilen Rover, uygun modüller takıldığında bir tarla veya sera içinde gezerek bitki ve toprak koşullarını izleyebilir, hatta doğrudan ürün hasadı yapabilir. Bu senaryo için araca DHT-11 gibi sıcaklık/nem sensörleri, toprak nemi ölçer sensörler, kamera sistemi ve mahsul toplamak için özel uç efektörü sahip bir robot kol modülü entegre edilmiştir.

Hava sıcaklığı ve nem değerleriyle mikroklima haritası çıkarak seranın hangi bölümlerinde havalandırma veya ısıtma gerektiğini belirleyebilir. Üzerindeki kamera ve yapay zekâ destekli görüntü işleme algoritmaları sayesinde bitkilerin yaprak renklerini, büyüme durumlarını veya olası hastalık belirtilerini tespit edebilir. Örneğin, yapraklardaki sararma veya lekelenme gibi durumlar erken uyarı olarak tespit edilip ilgili bitkilerin yakın incelemeye alınması sağlanabilir. Bu tür hassas tarım uygulamaları, kaynak kullanımını optimize ederek verimi artırmayı ve kimyasal ilaç kullanımını azaltmayı hedeflemektedir [5].

Modüler rover'ın tarım modülünde en dikkat çekici özelliklerinden biri, 5 DOF robot kolu kullanarak mahsul toplama yapabilmesidir. Kamera modülü ve görüntü işleme desteği sayesinde, bitki üzerindeki meyvelerin konumu ve olgunluk durumu tespit edilmektedir. Örneğin, bir domates serasında robot, sıra aralarında gezinirken her bir domates bitkisini kamerasıyla tarar; kırmızı renk yoğunluğunu ve boyutunu analiz ederek olgun domatesleri tespit eder. Tarımsal uygulamalarda modüler yapının avantajı, aynı sezon boyunca farklı işlere uyarlanabilmesidir. Örneğin, hasat dönemi dışında rover aynı tarlada ilaçlama veya gübreleme modülü taşıyarak gezebilir. İhtiyaç duyulduğunda robot kolun ucuna takılacak farklı aparatlar (püskürtme memesi, budama makası vb.) ile budama veya noktasal ilaçlama işleri gerçekleştirilebilir. Bu şekilde, tek bir robotik platform yılın farklı zamanlarında farklı görevler üstlenerek çiftçiye çok yönlü bir yardımcı olur.

IV. SONUÇLAR

Bu bildiride sunulan “Modüler Rover Aracı” projesi kapsamında, çok amaçlı ve modüler yapıya sahip bir mobil robotik platformun tasarımı, prototip üretimi ve temel testleri gerçekleştirilmiştir. Proje sonucunda ortaya konan sistem, tek bir robotun uygun modüler değişimlerle birden fazla senaryoda görev yapabileceğini gösteren başarılı bir örnek teşkil etmektedir. Hem mekanik hem elektronik açıdan yapılan entegrasyonlar sorunsuz çalışmış; robotun arazi şartlarında hareket edebildiği, sensörler vasıtasıyla çevresel verileri toplayabildiği ve robot kol ile basit manipülasyonlar gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir.

Geliştirilen prototip, birkaç basit değişiklik ile keşif robotundan tarım robotuna dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm için gereken sensör ve aparat değişimleri kolaylıkla yapılmıştır. Bu da modülerliğin sağladığı zaman ve maliyet avantajını somut olarak göstermiştir. Ayrıca, 3 boyutlu baskı ile hızlı prototipleme yaklaşımı sayesinde tasarım döngüsü hızlanmış, olası tasarım hataları düşük maliyetle giderilmiş ve öğrenci seviyesindeki bir proje kısıtlı zamanda kapsamlı bir sisteme dönüşmüştür.

Modüler yapının sunduğu en büyük avantajlardan biri, yeni görev modüllerinin sisteme hızlı ve esnek bir şekilde entegre edilebilmesidir. Gelecekte bu platform için yer altı suyu tespiti, yapay zekâ destekli zararlı analizi veya yük taşıma gibi modüller geliştirilerek kullanım alanı daha da genişletilebilir. Sistemin donanım ve yazılım tasarımının açık kaynaklı olarak paylaşılması, farklı üniversiteler ve araştırma gruplarının kendi ihtiyaçlarına göre sistemi uyarlamalarını mümkün kılacaktır. Sonuç olarak, geliştirilen modüler rover aracı, çok disiplinli bir çalışmanın ürünüdür ve robotik alanında modülerlik kavramının somut bir uygulamasını temsil etmektedir. “Tak-çıkır” prensibiyle yapılandırılan sistem, tek bir platformun farklı görevler arasında hızlı geçiş yapmasını sağlayarak hem zaman hem maliyet açısından önemli bir esneklik sunmaktadır.

Platformun işlevselliğini daha da artırmak amacıyla, görüntü işleme ve çevresel analiz algoritmalarının entegrasyonu planlanmaktadır. Yapay zekâ destekli bu sistemlerin, mobil cihazlar veya harici bilgisayarlar üzerinden çalışarak nesne tanıma, ürün olgunluk analizi ve ortam sınıflandırması gibi görevleri otomatikleştirmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, sensör verilerinin anlamlandırılması için makine öğrenmesine dayalı karar destek sistemlerinin geliştirilmesi de gündemdedir. Bu geliştirmelerle birlikte, rover platformunun yalnızca mekanik değil, aynı zamanda bilişsel açıdan da yüksek düzeyde otonomiye sahip, çok amaçlı bir robot sistemine evrilmesi amaçlanmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] Belter, J. T., & Dollar, A. M. (2015). Strengthening of 3D printed fused deposition manufactured parts using the fill compositing technique. *PloS one*, 10(4), e0122915.
- [2] Baris, C., Shifa, S., & Tatyana, T. (2024, February). A Design of a Modular Mobile Robot for Rescue Operations. In *Artificial Life and Robotics International Conference* (Vol. 29, pp. 267-271). 株式会社 ALife Robotics.
- [3] Moonpreneur. (2024, Nisan 26). *Is Arduino used in robotics? – An overview and future*. Moonpreneur. <https://mp.moonpreneur.com/blog/arduino-used-in-robotics/>
- [4] Rahman, F. S., Sugathan, G. T., & Manohar, S. (2023, November). RESCUEBOT: An Autonomous Fire Rescue and Management Robot. In *2023 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA)* (pp. 726-731). IEEE.
- [5] Yadav, A., Kholiya, D., Manjeet, Bastia, R., Bhavana, Ballabh, J., Sah, B., & Bankoti, P. (2025). Agricultural robotics: Automating the future of farming. *Journal of Neonatal Surgery*, 14(6), 538–545.
- [6] Autodesk, Ltd. (2023) Autodesk Inventor Professional 2023 (Version 2023.5) [Computer software]. <https://www.autodesk.com/tr/products/inventor/overview?panel=buy&term=1YEAR&tab=subscription&plc=INVPROSA>
- [7] Dassault Systemes, S.E. (2022) SOLIDWORKS STUDENT EDITION 2022 (Version SP4) [Computer software]. <https://www.solidworks.com/tr>
- [8] Interaction Design Lab Potsdam, (2022) Fritzing (Version 0.9.10) [Computer software]. <https://fritzing.org/releases/0-9-10>

Görüntü İşleme Tabanlı Geri Dönüştürülebilir Atık Sınıflandırma Sistemi

İlyas Er, Kenan Şentürk

Gelişim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekatronik Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu bildiride, geri dönüştürülebilir atıkların otomatik olarak sınıflandırılmasına yönelik, yalnızca geleneksel görüntü işleme tekniklerine dayanan düşük maliyetli ve uygulanabilir bir sistem önerilmektedir. Geliştirilen sistem, konveyör bant üzerinde hareket eden atıkları gerçek zamanlı olarak analiz ederek, renk, şekil, boyut ve dokusal özelliklerine göre sınıflandırma yapmaktadır. Atık materyaller, endüstriyel düzeyde yaygın olarak kullanılan RGB kamera ile görüntülenmekte ve bu görüntüler çeşitli ön işleme adımlarından geçirilmektedir. Ön işleme sürecinde gürültü giderme, kontrast artırımı ve uygun renk uzayı dönüşümleri uygulanmaktadır. Ardından segmentasyon, kenar tespiti, morfolojik işlemler ve görsel özellik çıkarımı gibi klasik görüntü işleme adımları gerçekleştirilir. Elde edilen sayısal özellikler, daha önceden etiketlenmiş verilerle eğitilmiş bir makine öğrenmesi modeli tarafından değerlendirilerek, atık materyaller PET, PVC, cam, metal ve kağıt gibi sınıflara ayrılır. Sınıflandırma sürecinde karar ağaçları ve destek vektör makineleri gibi görece basit ama etkili algoritmalar tercih edilmiştir. Sistem, Python programlama dili kullanılarak, OpenCV ve scikit-learn gibi açık kaynak kütüphanelerle geliştirilmiştir. Testler sonucunda yüzde 85'in üzerinde sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Bu yöntem, özellikle hiperspektral sistemlerin maliyetli olduğu ortamlarda ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüşüm, Görüntü İşleme, Cam, Metal, Plastik, Kağıt.

I. GİRİŞ

Günümüzde çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından geri dönüşüm sistemleri, şehir altyapılarının ve sanayi politikalarının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Artan kentleşme, nüfus yoğunluğu ve tüketim alışkanlıkları, giderek artan miktarda katı atık oluşumuna neden olmaktadır. Bu atıkların çevreye zarar vermeden toplanması, ayrıştırılması ve yeniden kullanıma kazandırılması hem ekonomik hem de ekolojik açıdan büyük önem taşımaktadır. Geri dönüşümün etkinliği için atıkların doğru sınıflandırılması ve kaynağında ayrıştırılması gerekir. Ancak bu işlem çoğunlukla insan gücüne dayalı yürütülmekte, bu da süreci yavaş, maliyetli ve hataya açık hale getirmektedir. Geleneksel atık ayrıştırma tesislerinde plastik, cam, metal ve kağıt gibi materyaller genellikle manuel olarak ayrılır. Bu durum, iş güvenliği risklerini artırmakta ve işlem süresini uzatmaktadır. Ayrıca benzer malzemelerin (örneğin saydam PET ve PVC) elle ayırt edilmesi zor olduğundan sınıflandırma hatalarına yol açabilmektedir. Bu zorluklar, atık yönetiminde otomasyona duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Son yıllarda bu alanda görüntü işleme, robotik ve yapay zekâ tabanlı sistemlere yönelik ilgi artmıştır. Görüntü işleme teknikleri, atıkların yüzey dokusu, rengi, şekli ve boyutu gibi fiziksel özelliklerini analiz ederek yüksek doğrulukla sınıflandırma yapılmasına imkân tanır. Hiperspektral sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle endüstride daha hızlı yaygınlaşmaktadır. Görüntü işleme temelli sistemlerde kamera aracılığıyla alınan görüntüler çeşitli analizlerden geçirilir; renk (RGB histogram, renk uzay dönüşümleri), şekil (kenar tespiti, kontur analizi), doku (GLCM, LBP) ve morfolojik işlemlerle sayısal özellikler çıkarılır. Bu veriler, eğitilmiş makine öğrenmesi modellerine aktarılır. Model, gelen yeni görüntüyü sınıflandırarak konveyör bant üzerindeki atıkları uygun mekanizma ile yönlendirir. Bu çalışmada, yalnızca geleneksel görüntü işleme tekniklerini kullanan, düşük maliyetli donanımlarla entegre edilebilen ve gerçek zamanlı

çalışabilen bir atık sınıflandırma sistemi tasarlanmıştır. Sistem, renk, şekil ve doku özelliklerini analiz ederek PET, PVC, cam, metal ve kağıt gibi sınıflara ayırmakta; Python diliyle OpenCV ve scikit-learn kullanılarak geliştirilmiştir. RGB kamera ve optimize edilmiş aydınlatma ile çalışan sistemde, sınıflandırma sonrası pnömatik hava jetleriyle fiziksel yönlendirme sağlanmıştır. Karar ağaçları ve destek vektör makineleri gibi klasik algoritmalarla yüksek doğruluk elde edilmiştir. Çalışma, düşük maliyetli klasik yöntemlerle atık sınıflandırmasının mümkün olduğunu göstererek küçük ve orta ölçekli tesisler için uygulanabilir, açık kaynaklı bir çözüm sunmaktadır.

II. YÖNTEM: GÖRÜNTÜ İŞLEME VE SINIFLANDIRMA YAKLAŞIMI

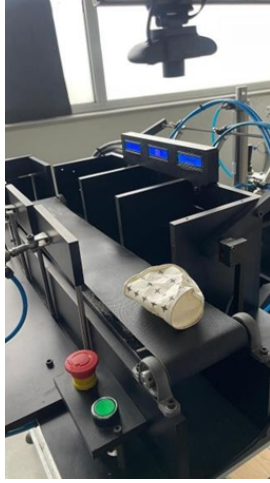
Bu çalışmada uygulanan yöntemsel yaklaşım, atıkların otomatik olarak tanımlanması ve sınıflandırılmasını hedefleyen dört temel aşamadan oluşmaktadır: (1) Görüntü Toplama, (2) Ön İşleme, (3) Öznitelik Çıkarımı ve (4) Sınıflandırma.

İlk aşama olan görüntü toplama sürecinde, düşük maliyetli bir RGB kamera kullanılarak konveyör bant üzerinde hareket eden atık nesnelerinin görselleri elde edilmiştir. Kamera, bant genişliğini tamamen kapsayacak şekilde 40 cm yukarıya yerleştirilmiş ve tüm görüntüler homojen aydınlatma koşulları altında toplanmıştır.

İkinci aşama olan ön işleme adımı, elde edilen ham görüntüler üzerinde gürültü giderme (noise reduction), renk düzeltme ve boyutlandırma gibi işlemler uygulanmıştır. Ayrıca, arka plan ile nesne ayrımını netleştirmek amacıyla çeşitli eşikleme (thresholding) ve segmentasyon teknikleri kullanılmıştır.

Öznitelik çıkarımı aşamasında, her bir atık görüntüsünden nesneyi temsil eden temel karakteristik özellikler (renk histogramları, şekil bilgisi, kenar yapısı vb.) elde edilmiştir. Bu öznitelikler, nesnelerin ayırt edilmesini sağlayan temel bileşenleri oluşturmaktadır.

Son olarak, sınıflandırma aşamasında ise çıkarılan öznitelikler, önceden eğitilmiş bir makine öğrenmesi algoritmasına (örneğin K-NN veya SVM) veya görüntü işleme kurallarına göre değerlendirilmiş ve her bir atık örneği ilgili sınıfa atanmıştır. Geliştirilen sistem, plastik, metal, karton, cam ve geri dönüştürülemeyen atıklar gibi farklı türleri yüksek doğruluk oranı ile ayırt edebilmektedir.

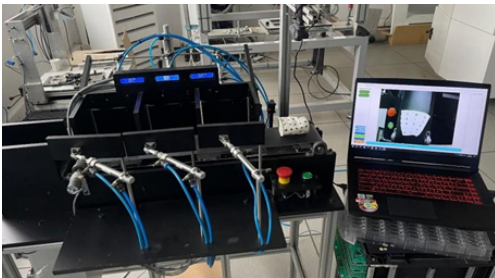


Şekil 1: Yöntem

II.1. Görüntü Toplama ve Ön İşleme

Sistem, 640x480 çözünürlüklü, endüstriyel uyumlu bir RGB kamera ile konveyör bant üzerindeki atıkları görüntülemektedir. Kamera, bantın yukarısına dik konumda yerleştirilmiş ve sabit aydınlatma için LED ışıklarla desteklenmiştir. Görüntülerin tutarlılığı için ışık koşulları sabit tutulmuştur. Ön işleme adımları şunlardır:

- Gürültü Giderme: Görüntüdeki rastgele paraziti azaltmak için Gauss bulanıklaştırma (Gaussian Blur) uygulanmıştır.
- Arka Plan Ayırma: Arka planın etkisini azaltmak için Otsu eşiği ve adaptif eşikleme teknikleri ile foreground (ön nesne) bölgesi çıkarılmıştır.
- Renk Dönüşümü: Görüntüler RGB'den HSV ve LAB renk uzaylarına dönüştürülerek renk temelli analizler için uygun hale getirilmiştir.



Şekil 2: Projenin tamamı

II.2. Öznitelik Çıkarım

Atık nesnelerin sınıflandırılabilmesi için görüntülerden çeşitli öznitelikler çıkarılmıştır. Bu öznitelikler şunlardır:

- Renk Özellikleri: HSV renk uzayında ortalama renk değerleri (Hue, Saturation), RGB histogramları
- Şekil Özellikleri: Kontur tabanlı özellikler, çevre/alan oranı, dikdörtgenlik (rectangularity), dairesellik (circularity), aspect ratio
- Doku Özellikleri: Gri seviyeli ortaklık matrisi (GLCM) üzerinden kontrast, homojenlik, entropi gibi ölçümler.
- Morfolojik Özellikler: Erozyon, genişleme sonrası nesne formu, yüzey düzgünlüğü.

III.3. Sınıflandırma Yaklaşımı

Çıkarılan öznitelikler, Python'un scikitlearn kütüphanesi kullanılarak eğitilen sınıflandırıcılara aktarılmıştır.

Kullanılan iki ana model:

- Random Forest (RF): Çoklu karar ağaçlarından oluşan, overfitting'e karşı dayanıklı ve hızlı çalışan bir model.
- Destek Vektör Makineleri (SVM): Sınıflar arasındaki sınırları maksimum ayıran doğrusal olmayan sınıflandırma algoritması.

III. SİSTEM TASARIMI VE UYGULAMA



Şekil 3: Uygulama

III.1. Donanım Bileşenleri

- RGB Kamera: 640x480 çözünürlükte, 30 FPS hızında çekim yapabilen endüstriyel kamera.
- LED Aydınlatma: Gölge ve parlama oluşturmada homojen ışık sağlayan yüksek CRI değerine sahip LED'ler.
- Konveyör Bant: 0.2 m/s sabit hızla dönen bant sistemi.
- NVIDIA işlemci PC: Görüntü işleme ve sınıflandırma süreçleri için kullanılan gömülü sistem platformu.
- Klappe kapak sistemi : Gelen ürünün ayıklanması ve haznelere ayrıştırılması için konveyör hattı önünde açılır ve kapanır şekilde konumlandırılmış kapaktır.

III. 2. Kamera Yerleşimi ve Kalibrasyon

Görüntü işleme sisteminin optimum performansla çalışabilmesi amacıyla kamera, konveyör bandının 40 cm üzerine yerleştirilmiştir. Kamera konumlandırılması, görüş alanının tüm bant genişliğini kapsayacak şekilde dikkatle ayarlanmıştır. Böylece bandın üzerinden geçen her bir atık nesnesi, kamera tarafından eksiksiz olarak görüntülenebilmiştir.

Sistemin doğruluğunu ve kararlılığını artırmak amacıyla, kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, renkli alanlar ve çeşitli geometrik desenler içeren özel referans tablolar kullanılmıştır.

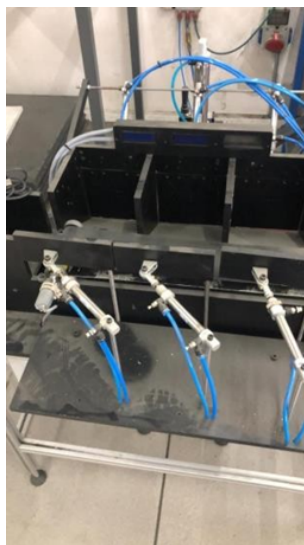
Kalibrasyon süreci, görüntü bozulmalarının (distorsiyon), perspektif hatalarının ve ışık kaynaklı değişkenliklerin en aza indirilmesini sağlamış; kamera sisteminin hem mekansal çözünürlüğü hem de renk doğruluğu optimize edilmiştir.

III.3. Yazılım Altyapısı

- OpenCV: Görüntü işleme operasyonları için.
- Scikit-learn: Makine öğrenmesi algoritmaları ve eğitim süreci için.
- PySerial: Arduino ile seri haberleşme için.

III.4. Klappe kapak sistemi

Geliştirilen sistemde, sınıflandırma işlemi Python tabanlı görüntü işleme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Görüntüden elde edilen veriler analiz edilerek ilgili atık türü belirlenmiş, bu sınıflandırma sonucuna göre uygun kontrol sinyali oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sinyal, PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör) ile haberleşme yoluyla sisteme iletilmiş ve belirlenen çıkış pinine aktarılmıştır. PLC, kendisine ulaşan komut doğrultusunda ilgili çıkış pinini aktif hale getirerek, sınıflandırılan atığa karşılık gelen haznenin önünde bulunan “klappe” (açılır kapak) mekanizmasını tetiklemiştir. Bu mekanizma sayesinde, her bir atık türü doğru hazneye yönlendirilerek otomatik bir ayrıştırma süreci sağlanmıştır.



Şekil 4: Klappe

IV. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Sistem performansının değerlendirilmesi amacıyla, farklı türlerde geri dönüştürülebilir atıklardan oluşan kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. Toplamda 500 adet örnek kullanılmış olup, her biri farklı atık türünü temsil eden beş ayrı sınıf için eşit sayıda, yani her sınıf için 100 örnek toplanmıştır. Sınıflar; plastik, metal, karton, cam ve geri dönüştürülemeyen atıklar olarak belirlenmiştir. Bu veri seti, sistemin sınıflandırma doğruluğunu ölçmek amacıyla eğitim ve test aşamalarında kullanılmıştır. Tüm örnekler, aynı ışık koşulları altında ve standartlaştırılmış bir düzende toplanarak sistematik bir şekilde etiketlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında, sistemin her bir atık türünü ne derece doğru sınıflandırabildiği analiz edilmiş ve başarı oranları detaylı olarak raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini ortaya koymuştur.

IV. 1. Sınıflandırma Oranları

Tablo 1: Sınıflandırma Oranları

Atık Türü	Doğruluk (%)
PET Plastik	92.5
PVC Plastik	89.8
Cam	94.3
Metal	90.4
Kağıt	91.7

IV.2. Hata Analizi

Yanlış sınıflandırmaların büyük kısmı, renk ve doku özelliklerinin çakıştığı nemli, etiketli ya da kirli atıklar arasında gözlenmiştir. Özellikle PVC ve PET türleri birbirine karışabilmiştir.

IV.3. Gerçek Zamanlı Performans

Sistem, saniyede ortalama 4 nesne işleyebilmekte ve endüstriyel düşük yoğunluklu uygulamalarda kullanılabilecek bir hızda çalışmaktadır. Görüntü alımı ile sınıflandırma süreci 220–250 ms aralığında tamamlanmaktadır.

V. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, yalnızca görüntü işleme tabanlı analiz teknikleri kullanılarak geliştirilen bir geri dönüştürülebilir atık sınıflandırma sistemi sunulmuştur. Geliştirilen sistem, düşük maliyetli bileşenlerle prototiplenmiş, farklı atık türlerini yüksek doğrulukla ayrıştırabilmiştir. RGB görüntü üzerinden elde edilen renk, şekil ve doku özelliklerinin makine öğrenmesi modelleriyle sınıflandırılması, hiperspektral gibi yüksek donanım gerektiren alternatiflere kıyasla yaygınlaştırılabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, derin öğrenme tabanlı nesne tanıma modellerinin (CNN gibi) klasik öznetelik çıkarım süreçlerinin yerini alması planlanmaktadır. Ayrıca, farklı atık türlerinin daha ayrıntılı sınıflandırılması, sistemin daha hızlı donanımlarla endüstriyel ölçekte yaygınlaştırılması ve RGB + NIR görüntü füzyon sistemlerinin karşılaştırmalı analizi yapılacaktır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing. Pearson.
- [2] OpenCV documentation. <https://docs.opencv.org/>
- [3] Pedregosa, F., et al. (2011). "Scikitlearn: Machine Learning in Python." Journal of Machine Learning Research, 12, 2825–2830.
- [4] Zhang, L., et al. (2016). "Recyclable Waste Classification Based on Computer Vision." Waste Management, 56, 505–513
- [5] DergiPark (2023). "Görüntü İşleme Teknikleri ile Geri Dönüştürülebilir Atık Sınıflandırması." Makine ve Otomasyon Dergisi, 17(2), 85–95.

Pres Uygulamaları İçin Akıllı Çubuk Mekanizması Tasarımı

Merve Şahin, Ali Cem Özer, Zelal Keser, Süleyman Kaan Davaz, Umut Karagöz

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, pres uygulamalarında farklı strok profillerine uyum sağlayabilen altı çubuklu bir bağlantı mekanizmasının geliştirilmesini ve optimize edilmesini kapsamaktadır. Parçaya özel hareket ihtiyacına yanıt verebilecek şekilde tasarlanan sistemde, mekanizma parametreleri Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasıyla hedef profillere benzerlik esas alınarak optimize edilmiştir. Benzerlik değerlendirmesinde zaman alanında Dinamik Zaman Bükme (DZB), frekans alanında ise Fourier tabanlı kosinüs benzerliği birlikte kullanılmıştır. Aynı mekanizma yapısında yalnızca bir bağlantı noktasının konumu değiştirilerek, 70 mm ve 140 mm strok uzunluklarına uyumlu iki farklı konfigürasyon elde edilmiş; böylece sistem fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilir ve ayarlanabilir strok özelliği kazanmıştır. Ayrıca, sisteme entegre edilen strain gauge sensörleri ile kuvvet ölçümü, OpenCV tabanlı görüntü işleme ile hareket takibi gerçekleştirilmiş; tüm bileşenler bir araya geldiğinde sistemin hem kararlılık hem de endüstriyel uygulanabilirlik açısından güçlü bir performans sergilediği doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: PSO, Bağlantı Mekanizması, Strok Takibi, DZB, Optimizasyon, Görüntü İşleme.

I. GİRİŞ

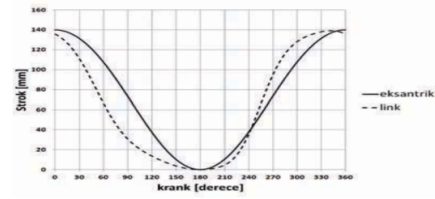
Pres sistemlerinde yaygın olarak kullanılan klasik krank mekanizmaları, genellikle sabit strok ve sabit hız profili üretir. Ancak bazı uygulamalarda, preslenen parçanın geometrisi ve işlem hassasiyeti nedeniyle strok profilinin uygulamaya özgü olarak şekillendirilmesi gerekebilir. Özellikle presleme işleminin başlangıcında, koçbaşının parçaya yaklaşırken yavaşlaması ve temas sonrası hızlanarak geri dönmesi istenir. Bu sayede hem parça yüzeyi zarar görmez hem de işlem süresi optimize edilir.

Şekil 1'de yer alan grafik, klasik eksantrik mekanizma (düz çizgi) ile bu çalışmada geliştirilen bağlantı mekanizmasının (kesikli çizgi) strok profillerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Görüldüğü üzere, eksantrik mekanizma simetrik bir hareket üretirken; bağlantı mekanizması, presin aşağı hareketinde yavaşlayıp yukarı hareketinde hızlanan, yani işlem açısından daha avantajlı bir asimetrik profil sunmaktadır.

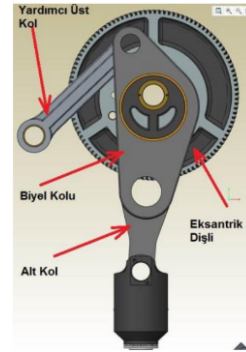
Bu tür asimetrik ve uygulamaya özel strok profilleri, geleneksel krank mekanizmalarıyla elde edilememektedir. Bu nedenle çalışmamızda, parametrik olarak uyarlanabilir altı çubuklu bir bağlantı mekanizması tasarlanmış ve bu profil benzerliğini artırmak amacıyla optimize edilmiştir.

Tasarlanan sistem, farklı strok gereksinimlerine göre yeniden yapılandırılabilir olması sayesinde klasik çözümlerin ötesinde esneklik sunmaktadır.

Şekil 2, altı çubuklu bağlantı mekanizmasının temel bileşenlerini ve genel çalışma prensibini göstermektedir. Bu tür yapılar, krank temelli klasik sistemlerin aksine, strok profilinin uygulama ihtiyacına göre esnek biçimde ayarlanabilmesine olanak tanır. Çalışmamızda geliştirilen mekanizma da benzer prensiplere dayalı olup, hedeflenen strok profiline uygunluk sağlamak üzere parametrik olarak optimize edilmiştir.



Şekil 1: Eksantrik ve çubuk mekanizma strok profilleri karşılaştırma grafiği [1]



Şekil 2: Altı çubuklu mekanizması tasarımı örneği [1]

Parametrik olarak optimize edilerek farklı uygulama ihtiyaçlarına uyarlanabilen pres mekanizmalarına yönelik çalışmalar sınırlıdır [2]. Bu nedenle, çok çubuklu mekanizmalarla hedefe uygun son nokta hareketinin üretilmesine yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [3]. Özellikle, türevlenemeyen ve çok boyutlu arama alanlarına sahip problemlerde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, mühendislik uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [4].

Benzer şekilde, mekanizmanın ürettiği hareketin önceden tanımlanmış hedef profil ile benzerliğini değerlendirmek amacıyla Dinamik Zaman Bükme (DZB) algoritması kullanılmaktadır. Ancak bu

algoritmanın mekanik sistem tasarımında kullanımı literatürde sınırlı kalmıştır [5].

Bu çalışmada temel amaç, pres mekanizmasının koçbaşının izlediği düşey hareketin belirli bir hedef profile olabildiğince yakın olmasını sağlamakla birlikte, aynı yöntemle farklı profillere de uyarlanabilir bir sistem elde etmektir. Bu amaçla, mekanizmanın bağlantı uzunlukları ve sabit pivot noktası PSO algoritması ile optimize edilmiştir.

Optimize edilen yapı, bağlantı elemanlarından birinin montaj konumu değiştirilerek fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilen ve bu sayede 140 mm ve 70 mm strok uzunluklarına sahip iki farklı profil üretilmektedir. Her profil için en uygun bağlantı parametreleri ayrı ayrı belirlenmiştir.

Optimizasyon sürecinde, zaman alanında Dinamik Zaman Bükme (DZB) ve frekans alanında Fourier tabanlı kosinüs benzerliği metrikleri kullanılarak hedef profil ile benzerlik ölçülmüştür. DZB, konuşma tanıma ve hareket analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmakla birlikte, bu çalışmada mühendislik odaklı bir probleme uygulanarak özgün bir kullanım alanı sunmuştur. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen hareketin hem hassas hem de mekanizma açısından kararlı olduğu doğrulanmıştır.

II. PARAMETRİK OPTİMİZASYON VE UYGUNLUK ANALİZİ

Bu bölümde, geliştirilen mekanizmanın hedef strok profiline uyum sağlayacak şekilde parametrik olarak optimize edilmesi süreci açıklanmıştır.

II.1. PSO Algoritmasının Yapısı ve Parametre Tanımı

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), doğadaki kuş sürülerinin kolektif hareketinden esinlenen sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntemde her çözüm adayı bir parçacık olarak temsil edilir ve bu parçacıklar, hem kendi buldukları en iyi konumu hem de sürü içindeki en iyi konumu referans alarak çözüm uzayında konumlarını günceller [4]. Bu çalışmada PSO, altı çubuklu bağlantı mekanizmasının belirli strok profillerine uygun hareket üretmesini sağlayacak parametrelerin belirlenmesi için kullanılmıştır.

Her parçacık, yedi bağlantı uzunluğu (l_0-l_6) ve bir başlangıç açısı (θ_0) olmak üzere sekiz parametre ile tanımlanmıştır. PSO algoritması, 50 parçacıktan oluşan bir popülasyonla başlatılmış ve 200 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Algoritma, MATLAB ortamında geliştirilmiş ve yürütülmüştür.

Çözüm uzayı, yalnızca fiziksel olarak gerçekleştirilebilir mekanizma konfigürasyonları ile sınırlandırılmıştır. Geometrik bütünlük, bağlantıların ulaşılabilirliği ve kapalı

formda çalışabilirlik gibi kriterler gözetilerek, uygun olmayan çözümler değerlendirme dışı bırakılmıştır.

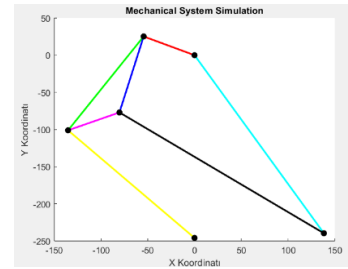
II.2. Hedef Profil Değerlendirmesi

Hedef strok profiline olan uygunluk, zaman ve frekans alanında iki farklı benzerlik ölçütü ile değerlendirilmiştir. İlk olarak, Dinamik Zaman Bükme (DZB) algoritması zaman serileri arasındaki senkronizasyon farklarını telafi ederek zaman ekseninde doğrusal olmayan uyumu ölçmektedir. İkinci olarak, kosinüs benzerliği metriği, profillerin Fourier dönüşümleri üzerinden frekans alanındaki yapısal benzerliği analiz etmektedir.

Bu iki kriter birlikte değerlendirilerek her parçacığa bir başarı skoru atanmakta, bu skorlar doğrultusunda PSO algoritmasının yönelimi belirlenmektedir. Böylece hem anlık benzerlik hem de genel eğilimdeki kararlılık göz önüne alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

II.3. Optimizasyon Sürecinin Uygulama Adımları

Mekanizma tasarım sürecine, GeoGebra ortamında yapılan kinematik analizlerle başlanmıştır. Bu analizler sayesinde mekanizmanın genel geometrisi, bağlantı noktaları ve hareket kabiliyeti görsel olarak test edilmiştir. Ancak GeoGebra'nın parametrik çözüm kabiliyetleri sınırlı olduğundan, daha sonra Şekil 3'te görüldüğü gibi MATLAB üzerinde simülasyon tabanlı bir modelleme yapılmıştır.



Şekil 3: MATLAB Simülasyon modeli

PSO algoritmasının temelinde, her bir parçacığın bir konumu ve bir hızı bulunmaktadır. Parçacıkların konumu, çok boyutlu parametre uzayındaki çözüm adaylarını temsil ederken; hızı, bir sonraki iterasyonda hangi yönde ve ne kadar ilerleyeceğini belirler. Parçacığın konumu formül 1 ve hızı formül 2'deki şekilde güncellenir:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (1)$$

$$v_i(t+1) = \omega * v_i(t) + c_1 * r_1 - (p_i - x_i(t)) - (2)$$

Burada:

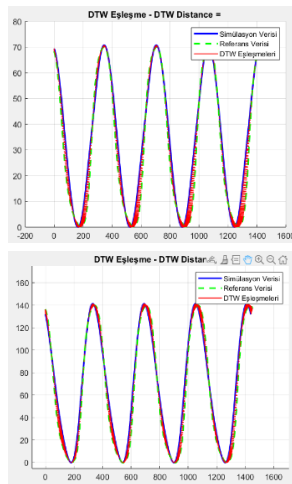
$x_i(t)$, i numaralı parçacığın t . iterasyondaki konum vektörü,
 $v_i(t)$, aynı parçacığın hız vektörü,
 ω , ataletsel ağırlık (önceki hızın etkisini belirler),
 p_i , parçacığın şu ana kadar ulaştığı en iyi konum (kişisel en iyi),
 g , tüm sürüdeki en iyi konum (küresel en iyi),
 c_1 ve c_2 , sırasıyla bilişsel ve sosyal katsayılar,
 r_1 ve r_2 , $[0,1]$ aralığında rastgele üretilen sayılar.

Bu yapı sayesinde her parçacık, hem kendi geçmiş başarımını hem de topluluktaki en iyi başarımı dikkate alarak karar verir. Atalet terimi, önceki hareket yönünü korumaya çalışırken; bilişsel terim, bireysel öğrenmeyi, sosyal terim ise kolektif öğrenmeyi temsil eder [4].

Optimizasyon sürecinde her parçacığın pozisyonu ve hızı iteratif olarak güncellenmekte, böylece parametre uzayı rastgele fakat yönlendirilmiş şekilde taranmaktadır.

Zaman serilerinin benzerliğini ölçmek için kullanılan Dinamik Zaman Bükme (DZB) algoritması, iki farklı uzunluktaki diziyi zamana bağlı olarak hizalayarak en düşük toplam maliyetli hizalamayı bulur. Bu hizalama, monotonluk, sınır ve adım boyu koşulları ile sınırlandırılmış bir “hizalama yolu” üzerinden gerçekleştirilir [5].

Bu çalışmada DZB, koçbaşının izlediği gerçek strok profili ile hedeflenen ideal profil arasındaki farkları zamana bağlı olarak en aza indirmek amacıyla kullanılmıştır. Her bir mekanizma konfigürasyonu için DZB algoritması ile bir benzerlik skoru hesaplanmış, bu skor mekanizmanın hedef profile ne kadar yakın hareket ettiğini nicel olarak ifade etmiştir. Bu skorlar, PSO algoritması tarafından mekanizmanın başarımını değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve en düşük toplam farkı sağlayan parametreler tercih edilmiştir. Şekil 4'te sırasıyla 70 mm ve 140 mm strok profiline sahip konfigürasyonların referans strok profili ile DZB grafikli karşılaştırmaları görülmektedir. DZB mesafesi 70 mm konfigürasyon için 258, 140 mm olan için ise 416 olarak hesaplanmıştır.

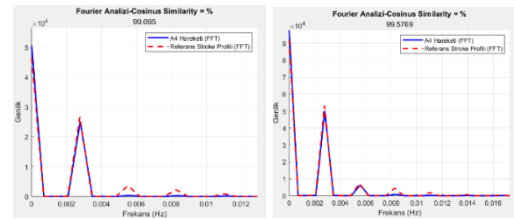


Şekil 4: DZB yöntemiyle karşılaştırma grafikleri

Farklı strok profillerinin yalnızca zaman alanında değil, aynı zamanda frekans bileşenleri açısından da benzerlik göstermesi beklenmektedir. Frekans düzeyindeki benzerliğin

değerlendirilmesinde kosinüs benzerliği metriği, sinyallerin spektral uyumunu ölçmek amacıyla kullanılmıştır [6]. Kosinüs benzerliği, iki vektör arasındaki açısal benzerliği ölçer ve genellikle yüksek boyutlu pozitif uzaylarda etkili sonuçlar verir. Özellikle örüntü tanıma, metin madenciliği ve bilgi erişiminde yaygın kullanılan bu yöntem, büyüklükten ziyade yönelime odaklanarak veri arasındaki benzerliği belirler [6].

Bu çalışmada, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile elde edilen frekans vektörlerinin yönelimi karşılaştırılmış; elde edilen kosinüs benzerlik değeri, DZB skoruyla birlikte PSO'da çok ölçütlü olarak değerlendirilmiştir. Böylece hem zaman hem frekans düzleminde hedef profile benzer çözümler elde edilmiştir. Kosinüs benzerliği metriğinde hedef, değerin 1'e mümkün olduğunca yaklaşmasıdır; bu durum, elde edilen çözüm profilinin frekans yapısının hedef profile yüzdelik olarak yüksek oranda benzediğini gösterir. Şekil 5'te sırasıyla 70 mm ve 140 mm strok profiline sahip konfigürasyonların referans strok ile HFD kosinüs benzerlikleri karşılaştırmaları görülmektedir. Kosinüs benzerliği 70 mm konfigürasyon için %99,1, 140 mm olan için ise %99,6 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5: HFD Kosinüs Benzerliği Karşılaştırması

III. GERÇEK SİSTEM TASARIMI VE UYGULAMA BİLEŞENLERİ

Bu bölümde, optimize edilen mekanizmanın fiziksel prototipleme süreci, entegre edilen sensör sistemleri ve konum takibi için kullanılan görüntü işleme altyapısı ayrıntılı olarak sunulmuştur.

III.1. Mekanizma Tasarımı ve Prototipleme Süreci

Tasarım çıktısı olarak belirlenen çubuk uzunlukları ve sabit pivot konumları, üretim süreçlerine uygun hale getirilmek üzere SolidWorks ortamında modellenmiştir. Mekanik tasarım sürecinde, yapının hem fonksiyonel hem de estetik açıdan bütünlük sağlamasına özen gösterilmiştir. Başlangıçta kaba geometriler üzerinden yapılan tasarım, ardından gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi (FEA) ile yapısal olarak değerlendirilmiş; elde edilen sonuçlara göre kritik parçalarda gerekli iyileştirmeler yapılmıştır.

Montaj kolaylığını artırmak ve modülerliği desteklemek amacıyla, belirli bölgelere slot tipi delikler açılmış; bu sayede yalnızca milin geçebileceği alanlar bırakılmış ve parçaların birbirinden tamamen ayrılmadan değiştirilebilmesi sağlanmıştır. Ek olarak, yapının tamamının demonte edilmesine gerek kalmaksızın kritik bileşenlere erişim mümkün hale getirilmiştir.

Nihai prototip, düşük maliyetli ve hızlı üretim hedefiyle PLA ve HDPE malzemeler kullanılarak 3D yazıcıda üretilmiştir. Mekanizma kolları arasında bağlantılar çelik pimlerle sağlanmış, dönel eklemlerde düşük sürtünmeli rulmanlar kullanılarak hareket kayıpları minimize edilmiştir.

Bu üretim süreci sonucunda, iki farklı strok ayarına olanak tanıyan modüler bir mekanizma elde edilmiştir. Kullanıcı, belirli bir bağlantı elemanının montaj yerini değiştirerek fiziksel müdahale ile 140 mm ve 70 mm strok profilleri arasında geçiş yapabilmektedir. Bu geçiş, herhangi bir özel ekipman gerektirmeksizin sıkı geçme prensibine dayalı olarak elle gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 6'da mekanizmanın montaj sürecinin son adımı görülmektedir.



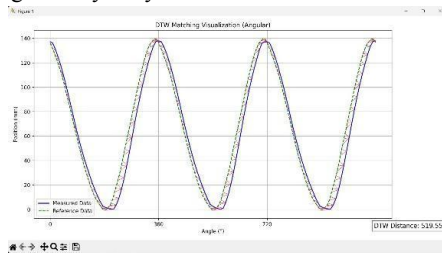
Şekil 6: Modüler mekanizmanın montaj görünümü

III.2. Görüntü İşleme ile Konum Takibi

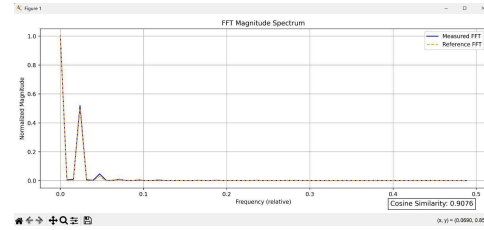
Ram ucuna yerleştirilen işaretleyici (marker), OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile takip edilmiştir. HSV renk uzayı üzerinden yapılan eşikleme işlemi, ortam ışığı değişimlerine karşı sistemin dayanıklılığını artırmış; ardından uygulanan maskeleme ve morfolojik açma/kapama filtreleriyle gürültü kaynaklı konturlar etkin şekilde elimine edilmiştir.

İzlenen marker konumunun zamana bağlı olarak daha kararlı biçimde gösterilmesi için Üstel Hareketli Ortalama (EMA) filtresi uygulanmıştır. Marker kaybı durumunda zaman damgalı log kayıtları oluşturularak sistemin izleme güvenilirliği artırılmıştır. Ayrıca, izlenen konumlar yapılan kamera kalibrasyonu sonucunda piksel/mm oranı ile mm cinsine dönüştürülerek referans strok profiliyle doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

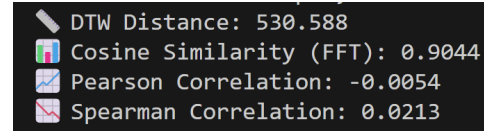
Görüntü işlemeyle anlık olarak elde edilen konum-zaman grafikleri, hedef strok profiliyle Dinamik Zaman Bükme (DZB) ve Fourier tabanlı kosinüs benzerliği yöntemleriyle karşılaştırılmış; böylece üretilen mekanizmanın hedef profile yakınlığı hem zaman hem frekans alanında sayısal olarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalar, Şekil 7-9'da verilmiştir. Gerçek sistemden elde edilen 140 mm strok profiline ait veriler, simülasyon sonuçlarıyla büyük ölçüde örtüşmektedir. Simülasyonda DZB mesafesi 416 iken, gerçek sistemde bu değer 533.005 olarak ölçülmüştür. Kosinüs benzerliği ise %99.6'dan %90.8'e düşmesine rağmen, genel profil uyumu korunmuştur. Bu sonuçlar, modellemenin fiziksel sistemle güçlü bir paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7: 140 mm'lik konfigürasyon gerçek vs. hedef konum-zaman grafiği



Şekil 8: 140 mm'lik konfigürasyon gerçek vs. hedef frekans analizi grafiği



Şekil 9: Gerçek benzerlik skorları

III.3. Kuvvet Ölçüm ve Strain Gauge Sistemi

Koçbaşına uygulanan kuvvetin izlenebilmesi amacıyla, sisteme iki adet strain gauge yerleştirilmiştir. Bu sensörler, ram'in karşılıklı yüzeylerine simetrik olarak konumlandırılarak ölçüm doğruluğu artırılmış ve dışsal gürültüler minimize edilmiştir.

Strain gauge çıkışları, yüksek hassasiyetli analog-dijital dönüştürücü (ADC) olarak kullanılan HX711 modülü ile okunmuş ve STM32 mikrodenetleyici aracılığıyla UART protokolü üzerinden bilgisayara aktarılmıştır. Kalibrasyon işlemi, kontrollü yük uygulaması sırasında referans verileri birlikte gerçekleştirilmiştir. Böylece sistem, presleme esnasında uygulanan kuvvetleri anlık olarak izleyebilmekte ve bu verileri kaydedebilmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma, pres uygulamaları için klasik mekanizmaların sınırlı kaldığı değişken strok ihtiyaçlarına alternatif bir çözüm sunmuştur. Tasarlanan altı çubuklu bağlantı mekanizması, yalnızca parametrik optimizasyonla değil, aynı zamanda fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilir özelliğiyle dikkat çekmektedir. Tek bir bağlantı elemanının konumu değiştirilerek farklı strok profillerine geçiş yapılabilmesi, sistemi hem esnek hem de pratik hale getirmiştir.

Gerçek sistemde, düşük maliyetli malzeme ve açık kaynaklı görüntü işleme altyapısıyla gerçekleştirilen izleme yöntemi, hedef profilin hem zaman hem de frekans alanında başarıyla takip edilebildiğini göstermiştir. Yüksek benzerlik skorları, optimizasyon sürecinin etkinliğini kanıtlamaktadır.

Ayrıca, entegre edilen kuvvet ölçüm sistemi sayesinde sadece hareketin değil, uygulanan yükün de izlenebilmesi; bu sistemi yalnızca bir hareket mekanizması olmaktan çıkartıp kontrol ve kalite geri beslemesi içeren bir yapıya dönüştürmüştür.

Bu yönleriyle çalışma, modüler, geri besleme uyumlu ve uygulamaya özel özelleştirilebilen pres mekanizmalarının endüstriyel sistemlerde nasıl bir potansiyel taşıdığını somut olarak ortaya koymuştur. Gelecekte bu sistem, kapalı çevrim kontrol, yapay zekâ destekli profil tanıma veya uyarlanabilir yük yönetimi gibi alanlarda geliştirilmeye uygundur.

V. KAYNAKLAR

- [1] Link drive mechanical press CDCL [PDF], (n.d.).
- [2] Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2016). *Theory of Machines and Mechanisms* (5th ed.). Oxford University Press.
- [3] Angeles, J. (2003). *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*, Springer.
- [4] Marini, F., & Walczak, B. (2015). Particle Swarm Optimization (PSO). A tutorial, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153–165.
- [5] Müller, M. (2007). Dynamic time warping. In *Information Retrieval for Music and Motion* (pp. 69–84). Springer.
- [6] Xia, P., Zhang, L., Li, F. (2015). Learning Similarity with Cosine Similarity Ensemble, *Information Sciences*, 307, 39–52.

Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü İşleme ile Otonom Görev Yürüten Su Altı Aracının Geliştirilmesi

Nezire Tosun, Muhammet Mustafa Şaşı, Bilalhan Göktaş

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, görevlerini otonom şekilde gerçekleştirebilen, yapay zekâ destekli bir insansız su altı aracının tasarımı ve geliştirilme süreci ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Sistem; mekanik yapı, elektronik donanım ve yazılım katmanları arasında yüksek düzeyde entegrasyon sağlayacak şekilde modüler olarak kurgulanmıştır. Araç şasesi, dayanıklılık ve hafiflik dengesini sağlamak amacıyla yüksek yoğunluklu polietilen malzeme kullanılarak CNC kesim yöntemiyle üretilmiş, özellikle su altı basıncına karşı direnç gösterecek şekilde optimize edilmiştir. Mekanik yapı, kablo yönetimi kolaylığı ve darbe emici tasarım kriterleri göz önünde bulundurularak inşa edilmiştir. Elektronik sistemlerde, yüksek akım taşıyan hatlar kısa devre riskine karşı korumalı hatlarla izole edilmiş, sinyal taşıyan devreler ise elektromanyetik paraziti en aza indirecek şekilde yönlendirilmiştir. Sistemde kullanılan Hall effect sensörleri ile temassız kontrol sağlanmış; güvenli güç yönetimi, regülasyon hatları ve sigorta devreleriyle desteklenmiştir. Yazılım tarafında, görüntü işleme algoritmaları su altı ortamına özgü zayıf aydınlatma, bulanıklık ve spektral bozulmaları giderecek biçimde optimize edilmiştir. Ön işleme adımlarının ardından YOLOv3 modeli ile nesne tespiti gerçekleştirilmiş, bu tespitler otonom kontrol algoritmaları ile ilişkilendirilerek görev tamamlamaya yönelik aksiyonlar alınmıştır. Sistem, görev planlama, veri toplama ve anlık karar verme süreçlerini kapsayan çok katmanlı yapısıyla test ortamlarında başarıyla çalıştırılmıştır. Geliştirme süreci boyunca uygulanan entegrasyon, montaj ve test aşamaları, önceden belirlenmiş takvime ve görev senaryolarına uygun olarak tamamlanmış; elde edilen sonuçlar, sistemin saha koşullarına hazır olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Su Altı Aracı, Yapay Zekâ, Derin Öğrenme, Görüntü İşleme, YOLOv3, PID Kontrol, Otonom Navigasyon, ArduSub, MAVLink Protokolü, Raspberry Pi, Pixhawk, Nesne Tespiti, Su Altı Robotları, Biyomimetik Tasarım, Sinyal İşleme.

I. GİRİŞ

İnsansız su altı araçları (ISAU), deniz tabanı haritalama, çevresel gözlem, boru hattı izleme, askeri devriye ve arama-kurtarma gibi birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Yuh, 2000; Griffiths, 2002). Otonom görev icra edebilme kabiliyeti, hem operasyonel etkinliği artırmakta hem de tehlikeli koşullarda insan müdahalesine olan ihtiyacı azaltmaktadır. Bu nedenle su altı robotlarının tasarımı, yalnızca mekanik dayanım değil aynı zamanda gelişmiş yapay zekâ tabanlı kontrol sistemlerini de içerecek şekilde çok disiplinli bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

Bu çalışmada geliştirilen sistem, biyomimetik yaklaşım doğrultusunda doğal organizmalardan esinlenerek oluşturulmuş dış form sayesinde düşük algılanabilirlik ve hidrodinamik verimlilik elde etmektedir (Antonelli, 2014). Şase tasarımı, yüksek eylemsizlik momentine sahip 20x40 mm alüminyum kutu profiller kullanılarak gerçekleştirilmiş; karbon kompozit parçalar ve 3D baskı bileşenlerle desteklenerek rijitlik ve hafiflik dengesi sağlanmıştır. Elektronik mimaride, görev paylaşımı yapılmış çift denetleyici yapı kullanılmıştır. Raspberry Pi 5, görüntü işleme ve üst seviye görev yönetimini yürütürken, Pixhawk Orange Cube+ alt seviye kontrol, yönelim ve derinlik denetimini üstlenmektedir. Güç yönetimi, regülasyon ve haberleşme protokolleri (MAVLink) ile desteklenmiş; sinyal kararlılığı ve güvenliği göz önünde bulundurularak devre yapısı EMC açısından optimize edilmiştir (Koubâa et al., 2019).

Yapay zekâ temelli görüntü işleme modülü, su altı ortamında karşılaşılan düşük görüş koşullarına karşı özel olarak

yapılandırılmıştır. OpenCV kütüphanesi üzerinden yürütülen ön işleme adımlarıyla kontrast artırımı, renk düzeltme ve gürültü giderme gerçekleştirilmiş; ardından YOLOv3 mimarisi ile nesne tespiti yapılmıştır. Bu yapı, özellikle bulanık ve düşük kontrastlı görüntülerde bile hedef nesneleri başarıyla tanımlayabilmekte; karar mekanizmasına aktararak otonom aksiyon alınmasına olanak tanımaktadır (Bradski, 2000; Redmon & Farhadi, 2018).

Bu bütünlük sistemin amacı, su altı görevlerinde hem yapısal sağlamlık hem de bilişsel karar verme becerilerini bir araya getirerek görev başarımını artırmaktır. Geliştirilen araç, test ortamlarında gerçekleştirdiği görevleri başarıyla tamamlamış ve bu doğrultuda, benzer projelere referans teşkil edebilecek düzeyde tasarım ve uygulama çıktılarına ulaşmıştır.

II. ARAÇ TASARIMI

Su altı ortamlarının fiziksel gereklilikleri, insansız araçların tasarımında yüksek yapısal dayanıklılık, denge optimizasyonu, hidrodinamik verimlilik ve modülerlik gibi çok boyutlu kriterleri zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen araçta hem statik hem de dinamik koşullara dayanım sağlayacak şekilde çok bileşenli bir mekanik yapı tasarlanmıştır. Yapının formu, akışa karşı minimum direnç sağlayacak şekilde doğal su canlılarından esinlenerek şekillendirilmiş ve altıgen temelli bir geometriyle desteklenmiştir.

II.1. Şasi ve Yapısal Gövde

Taşıyıcı yapı, 20x40 mm ebatlarında alüminyum kutu profiller kullanılarak oluşturulmuştur. Bu tercihte, profilin yüksek eylemsizlik momentine sahip olması ve darbe altında rijitliğini koruyabilmesi belirleyici olmuştur. Yapılan hesaplamalara göre, 20x40 mm profilin eylemsizlik momenti, 20x20 mm sigma profile kıyasla yaklaşık 8 kat daha yüksektir. Bu yapı, su altı basıncına karşı gerçekleştirilen statik analizlerde deformasyon göstermemiştir.

Kablo yönetimi, profillerin içerisine açılan hatlar aracılığıyla entegre edilmiş ve yüzeyde kablo görünürlüğü en aza indirilmiştir. Bu hem estetik bütünlük hem de bakım kolaylığı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

II.2. Malzeme Seçimi ve Bileşenler

Gövdede kullanılan karbon kompozit malzemeler, yüksek mukavemet / düşük yoğunluk oranı sayesinde su altı denge durumunu desteklemekte; bazı yapısal bölgelerde ise ağırlık merkezini optimize etmek adına çelik sac levhalar tercih edilmiştir. Bu malzeme seçimi, yüzdürme kontrolü ve batma stabilitesi açısından dengeleyici rol oynamaktadır.

Ayak ve dış koruma elemanları, 3D yazıcı teknolojisiyle PLA+ filament kullanılarak üretilmiştir. %70 doluluk oranı ve 3 mm duvar kalınlığı ile basılan parçalar, yapılan testlerde 30 N kuvvete kadar deformasyon göstermemiştir. Bu sayede darbelere karşı dayanıklı ve hafif bir destek yapısı elde edilmiştir.

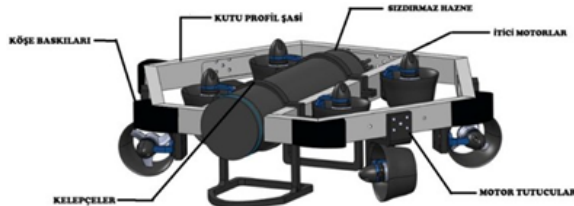
II.3. Sızdırmazlık ve Gövde Bütünlüğü

Sistem içerisindeki hassas bileşenlerin korunması amacıyla H100 serisi sızdırmaz hazne kullanılmıştır. Anodize alüminyum ve krom alaşımlı yapısıyla bu hazne, korozyona karşı yüksek direnç göstermekte ve tuzlu su ortamında yapısal bütünlüğünü korumaktadır. O-ring conta sistemleri ile sızdırmazlık doğrulanmış, havuz testlerinde su girişine rastlanmamıştır.

II.4. Hidrodinamik Analiz ve Optimizasyon

Tasarım sürecinde gerçekleştirilen akış analizlerinde, aracın ön bölümünde basınç dağılımı optimize edilmiş ve türbülans oluşum bölgeleri minimize edilmiştir. Akış hatlarında yer alan keskin kenarlar, 3D yazıcıdan üretilen kavisli parçalarla düzeltilmiş; böylece sürüklenme kuvvetlerinde belirgin bir azalma sağlanmıştır.

Basınç sensörleri ile elde edilen SG kuvveti verilerine göre, su altındaki batma ve yüzdürme geçişleri sırasında sistemin Z yönündeki kuvvet tepkileri dengelenmiş ve durağan bir hareket profili elde edilmiştir.



Şekil 1: Araç Tasarım Görseli

III. ELEKTRONİK SİSTEM TASARIMI VE ALGORİTMALAR

III.1. Güç Dağılımı ve Kontrol Birimleri

Geliştirilen sistemde güç dağılımı, enerji verimliliği ve güvenlik açısından kritik bir role sahiptir. Ana güç kaynağı olarak kullanılan 4S 10000mAh Li-Po batarya, yüksek akım ihtiyacını karşılayabilme kapasitesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu bataryadan elde edilen enerji, DEĞZ HI-BASE güç dağıtım kartı aracılığıyla sistemin farklı bileşenlerine yönlendirilmiştir. Güç kartı, voltaj regülasyonunun hassasiyetle gerçekleştirilebildiği, düşük kayıplı bir yapıya sahiptir. Sistemde 5V regülasyon hattı Raspberry Pi 5 ve Pixhawk Orange Cube+ kontrolörlerine, 12V hattı ise aydınlatma sistemleri, kamera ve ESC (Elektronik Hız Kontrolcü) birimlerine yönlendirilmiştir. Sistemin açma- kapama işlemleri temassız bir şekilde Hall effect sensörleri aracılığıyla yapılmakta, böylece kıvılcım ve fiziksel aşınma riskleri ortadan kaldırılmaktadır (Meier et al., 2011).

III.2. Sensör Entegrasyonu ve Veri İşleme

Sistem tasarımı sırasında çevresel farkındalık ve hassas kontrol gereksinimlerini karşılamak amacıyla birden fazla sensör entegre edilmiştir. Derinlik ve mesafe ölçümleri için kullanılan sensörler I2C iletişim protokolü ile sisteme bağlanmış ve seviye dönüştürücüler ile uyumlandırılmıştır. I2C hattı, veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla çoğaltıcı modül üzerinden dağıtılmıştır. Pixhawk üzerinde çalışan ArduSub yazılımı, derinlik ve yönelim verilerini işleyerek hareket kontrol algoritmalarını yönetir. Raspberry Pi ise, görev yönetimi, görüntü işleme ve üst seviye karar verme işlemlerini üstlenmiştir. İki kontrolcü arasında yüksek güvenilirlikte veri iletimi, MAVLink protokolü aracılığıyla çift yönlü olarak sağlanmaktadır (Koubâa et al., 2019).

III.3. Kontrol ve Navigasyon Algoritmaları

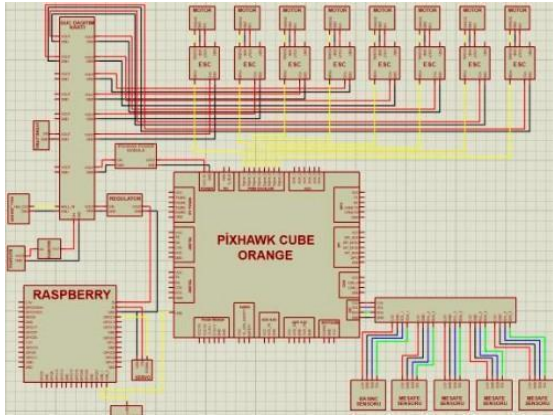
Araç üzerindeki kontrol mimarisi, çok katmanlı ve otonomiye uyumlu bir yapıdadır. Yön, derinlik ve hedefe ulaşım gibi görevler, PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyici algoritmasıyla hassas şekilde yönetilmektedir. Derinlik kontrolü için barometrik basınç sensörü verileri kullanılırken, yön kontrolü için dijital pusula ve IMU verileri işlenmektedir. GPS'in kullanılmadığı su altı ortamlarında konum kestirimi için Dead Reckoning algoritması tercih edilmiş, bu algoritma geçmiş yönelim ve hız verilerine dayanarak aracın yaklaşık konumunu hesaplamaktadır. Rota takibi ise Pure Pursuit algoritması ile gerçekleştirilmiş, bu sayede belirlenen referans yol üzerinden sapmadan ilerleme sağlanmıştır. PID kontrol sinyalleri, motorlara aktarılan PWM değerleri olarak üretilmekte, bu da aracın kararlı ve pürüzsüz hareketini sağlamaktadır (Åström & Murray, 2010; Scaramuzza & Fraundorfer, 2011).

III.4. Görüntü İşleme ve Nesne Tespiti

Görüntü işleme altyapısı, su altı ortamlarının düşük görüş koşullarına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Görüntü, Raspberry Pi'ye bağlı kamera modülü tarafından sürekli alınmakta ve OpenCV kütüphanesi aracılığıyla işlenmektedir (Bradski, 2000). İlk aşamada, renk düzeltme (color correction), histogram eşitleme ve kontrast artırımı

gibi ön işleme adımları uygulanarak su altı görüntülerinin netliği artırılmaktadır. Bu işlemlerin ardından, nesne tespiti için YOLOv3 (You Only Look Once) derin öğrenme modeli devreye girmekte; düşük kontrastlı veya bulanık görüntülerde dahi hedef nesnelerin sınıflandırılması ve konum tespiti başarıyla gerçekleştirilmektedir (Redmon & Farhadi, 2018).

Elde edilen tespit sonuçları, sistemin karar algoritmasına aktarılmakta ve nesneye göre pozisyon alma, yön değiştirme veya görev tetikleme gibi işlemler başlatılmaktadır. Bu yapı sayesinde araç, insan müdahalesine gerek duymadan çevresindeki objeleri algılayabilmekte ve otonom hareket kabiliyeti kazanmaktadır. Görüntü işleme süreci gerçek zamanlı çalışmakta ve görev başarı oranını önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 2: Elektronik Tasarım Görseli

IV. YAZILIM MİMARİSİ

Geliştirilen sistemin yazılım altyapısı, görev kontrolü, veri işleme, sensör entegrasyonu ve iletişim katmanlarını kapsayan modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Uygulama dili olarak Python tercih edilmiş; bu sayede OpenCV (Bradski, 2000), pymavlink ve derin öğrenme kütüphaneleri ile hızlı entegrasyon sağlanmıştır.

Yazılım, Raspberry Pi 5 üzerinde çalışmakta olup, görev senaryolarını yönetmekte ve görüntü işleme algoritmalarını çalıştırmaktadır. Kamera verileri işlendikten sonra nesne tespiti için YOLO modeline aktarılır (Redmon & Farhadi, 2018), elde edilen sonuçlar göreve özgü aksiyonlara dönüştürülür. Aynı zamanda servo açısı, basınç verisi, derinlik ve yön bilgileri bu merkezden takip edilmektedir. Kontrol katmanı, ArduSub yazılımı ile Pixhawk üzerinde çalışır. PID, Dead Reckoning ve Pure Pursuit algoritmaları bu katmanda devrededir (Åström & Murray, 2010). Sistemin tüm haberleşmesi MAVLink protokolü üzerinden çift yönlü olarak gerçekleştirilmekte ve veriler zaman damgalı şekilde senkronize edilmektedir (Meier et al., 2011).

Yerden kontrol istasyonu, PyQt6 ile geliştirilmiş bir arayüz üzerinden SSH bağlantısı aracılığıyla araca bağlanmakta; görev yükleme, veri takibi ve yazılım güncellemeleri buradan yönetilmektedir. Bu yapı sayesinde sistem uzaktan güncellenebilir, görevler değiştirilebilir ve test süreçleri kolaylaştırılmış olur.



Şekil 3: Araç Görseli

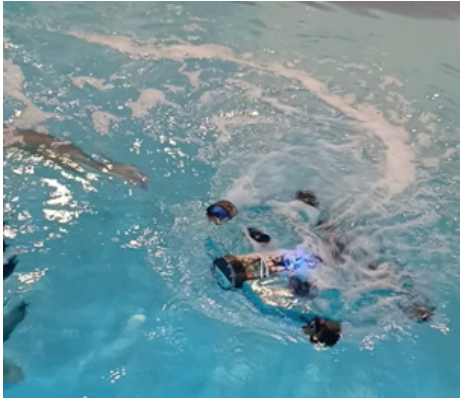
V. SONUÇLAR

Geliştirilen insansız su altı aracı, farklı çevresel koşullar altında toplam 50 saat boyunca test edilmiştir. Bu testler; kapalı yüzme havuzu, açık deniz ve baraj gibi farklı su ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı su yoğunlukları, tuzluluk oranları ve akış koşulları sebebiyle, aracın PWM kontrollü iticilerinin her ortamda farklı düzeyde kuvvet üretmesi gerektiği tespit edilmiştir. Özellikle deniz ortamında, aracın aşağı yönlü hareketi için havuz ortamına kıyasla daha yüksek PWM sinyallerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum, deniz suyunun daha yüksek yoğunluğu ve tuzluluğu nedeniyle aracın kaldırma kuvvetinin artmasıyla ilişkilidir (Yuh, 2000; Fossen, 2011).

Aracın farklı hız seviyelerinde çalışma performansını değerlendirmek amacıyla yapılan süreli testlerde; %75 PWM seviyesinde 30 dakika ve %50 PWM seviyesinde 45 dakika boyunca kesintisiz çalışma yapılmıştır. Bu testler sonucunda araç üzerindeki motorların ısınma eğrileri, enerji tüketimi ve itici verimi gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, su altı araçlarının farklı görev modlarında performans/enerji optimizasyonunun önemini bir kez daha ortaya koymaktadır (Whitcomb, 2000).

Navigasyon performansına yönelik testlerde, Hall etkisi sensörlerinin pusula verilerini bozduğu tespit edilmiştir. Bu sensörlerin neden olduğu elektromanyetik parazit, aracın yönelim (heading) verisinde sapmalara neden olmuş ve navigasyon algoritmalarının doğruluğunu olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle Hall etkisi sensörleri sistemden çıkarılmış ve yalnızca dijital pusula sensörü ile yönelim ölçümü yapılmasına karar verilmiştir. Benzer durumlar, elektromanyetik uyumluluğun (EMC) önemini vurgulayan diğer su altı araç çalışmalarında da rapor edilmiştir (Paull et al., 2014).

Ayrıca, manuel test operasyonlarında güvenliği artırmak ve acil durumlarda müdahaleyi kolaylaştırmak amacıyla, araca açma-kapama butonu entegre edilmiştir. Bu tür basit ancak etkili donanımsal önlemlerin, operatör kontrollü görevlerde hata toleransını artırdığı literatürde de vurgulanmaktadır (Manley, 2008).



Şekil 4: Araç Test Anı

VI. KAYNAKLAR

- [1] Yuh, J. (2000). Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*, 8(1), 7–24.
- [2] Griffiths, G. (2002). *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. CRC Press.
- [3] Antonelli, G. (2014). *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*. Springer.
- [4] Koubâa, A., Allouch, A., Javed, Y., Belghith, A., & Khalgui, M. (2019). Aerial-ground wireless sensor and robot networks for smart agriculture: An overview. *IEEE Communications Magazine*, 57(9), 134–140.
- [5] Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- [6] Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.
- [7] Meier, L., Tanskanen, P., Heng, L., Lee, G. H., Fraundorfer, F., & Pollefeys, M. (2011). PIXHAWK: A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision. *Autonomous Robots*, 33(1), 21–39.
- [8] Åström, K. J., & Murray, R. M. (2010). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press.
- [9] Scaramuzza, D., & Fraundorfer, F. (2011). Visual odometry [tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 18(4), 80–92.
- [10] Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley.
- [11] Whitcomb, L. L. (2000). Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 1, pp. 709–716). IEEE.
- [12] Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. (2014). AUV navigation and localization: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 131–149.
- [13] Manley, J. E. (2008). Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In *OCEANS 2008*, pp. 1–4. IEEE.

Elektrotermal Mikroaktüatörde Boşluk Geometrisinin FEM ile Termomekanik Modellemesi ve Analizi

Abdülhamit Bıyık¹, Gözde Konuk Ege², Abdülkadir Ünal¹, Nihat Akkuş¹

¹*marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

²*İstanbul Gedik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye*

ÖZET

Bu çalışmada, U- şeklindeki elektro-termal mikro çubuk aktüatördeki boşluk geometrisinin değişmesiyle aktüatör modelimizde oluşan deplasmanları, sıcaklık dağılımları ve reaksiyon kuvvetleri incelenerek daha verimli bir MEMS (Mikro Elektro-Mekanik Sistemler) aktüatör modeli oluşturulmak istenmiştir. Çalışmada aktüatör üzerindeki boşlukların alanı eşit olmak koşuluyla beraber oluşturulan modeller sonlu elemanlar analizi metoduyla simüle edilerek en uygun model elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmamızda aktüatörde meydana gelen değişimler incelenerek elde edilen veriler neticesinde sıcak ve soğuk kol üzerinde x- ve y- eksenlerinde meydana gelen deplasmanlar hesaplanmıştır. Sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sonlu Elemanlar Analizi, MEMS, Mikroaktüatör, Geometri Etkisi

I. GİRİŞ

Mikro Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) teknolojisi ilk olarak mikroelettronik endüstrisinde geliştirilmiş ve entegre devre üretim süreçlerinin evrilmesiyle şekillenmiştir. Silikon temelli bu teknoloji ile mikron boyutunda sensörler, anahtarlar, filtreler ve mekanik bileşenler üretilebilmiştir. Günümüzde MEMS teknikleri ilaç keşfi, doku mühendisliği, tanı sistemleri ve yüksek verimli tarama analizleri gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [1].

MEMS tabanlı termal aktüatörler genellikle termal genişlemenin mekanik hareketi büyümesi prensibiyle çalışan mikromekanik yapılardır. Aktüatörün belirli bir bölgesindeki sınırlı termal genişleme tüm sistemde belirgin bir sapma oluşturarak hareket sağlar. Bu yapılar çoğunlukla katkılı tek kristal silisyum veya polisilisyumdan imal edilmekte olup, sıcaklık artışı dahili elektriksel dirençli ısıtma yoluyla veya lokal bir ısı kaynağı aracılığıyla elde edilmektedir [2].

MEMS'in uygulama alanları arasında ivme ve hareket algılama, akışkan basınç ölçümü, optik sistemler, mikromotorlar ve BioMEMS uygulamaları öne çıkmaktadır. İnkjet yazıcılar, araçlardaki hava yastığı sistemleri, tekerlek basınç sensörleri ve akıllı telefonlardaki hareket algılayıcılar gibi pek çok günlük yaşam uygulamasında MEMS teknolojilerinden yararlanılmaktadır.

Literatürde elektrotermal mikroaktüatörler üzerine birçok çalışma mevcuttur [3]–[13]. Örneğin Huang ve Chen [14], 2000 $\mu\text{m} \times 2000 \mu\text{m}$ boyutlarında ve 200 μm kalınlığında bir mikro tutucu tasarlamış, nikel malzeme kullanarak kalıplama teknolojisi ile üretmişlerdir. Elektrotermal mikroaktüatör tarafından sağlanan yaklaşık 6000 μN kuvvet, yer değiştirme yükselteciye iletilmiş ve 1,5 V uygulandığında tutucu ucunda 18 μm 'lik sapma elde edilmiştir.

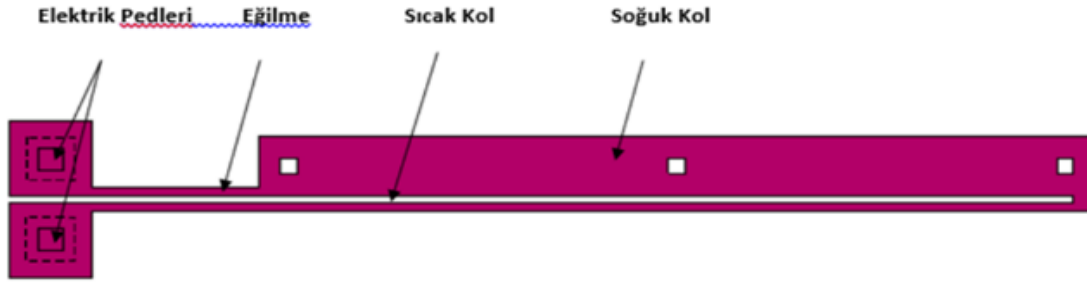
Termo-pnömatik aktüatörler konusunda çalışan van den Broek ve Elwenspoek [15], geliştirdikleri patlayıcı mikro kabarcık aktüatörü ile 5 kHz'e kadar frekanslarda çalışarak birkaç bar basınç ve mikrometre düzeyinde zar deformasyonu elde etmişlerdir. Boşluktaki gaz basıncının performansa etkisini incelemişler ve artan basıncın, tekrarlayan gaz kabarcıklarının oluşturduğu olumsuz etkileri azaltarak aktüatörün çalışma frekansını artırabileceğini ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada ise elektrotermal mikro çubuk aktüatörlerde boşluk (cavity) geometrisinin değişiminin, sistemin yer değiştirme performansına ve sıcaklık dağılımına etkileri incelenmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) tabanlı simülasyonlar kullanılarak farklı geometriler değerlendirilmiş ve daha verimli bir aktüatör modeli belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulguların, MEMS tabanlı aktüatörlerin tasarımı ve üretim verimliliği açısından yeni bir bakış açısı kazandıracağı düşünülmektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

II.1. Simüle Edilen Modeller

Şekil 1'de gösterilen u şeklindeki elektro-termal mikro aktüatör modeli referans model olarak kullanılmıştır. Şekil üzerindeki boşluklar alanların sabit kalması koşuluyla değiştirilerek yeni modeller oluşturulmuştur. Yeni modellerdeki boşluk geometrileri kare, daire, dikey dikdörtgen ve yatay dikdörtgen olarak belirlenmiştir. Dikdörtgenlerin kenar uzunlukları arasındaki oran a-2a olarak ayarlanmıştır.

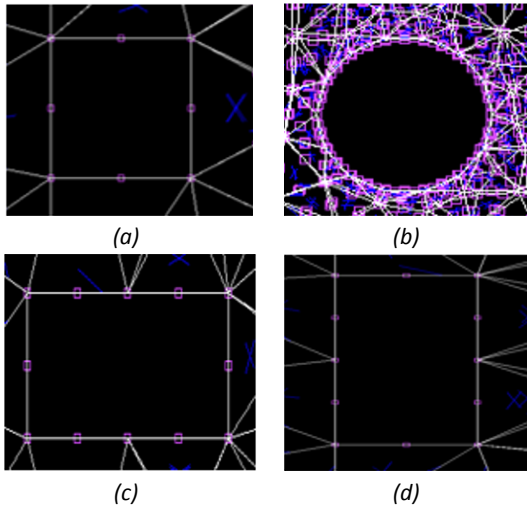


Şekil 1: Aktüatör modeli

Referans aktütörün geometrisi hakkındaki bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Referans model için geometrik bilgiler

No	Parametre	Değer	Birim
1	Sıcak Kol Uzunluğu	240	μm
2	Soğuk Kol Uzunluğu	200	μm
3	Sıcak Kol Genişliği	2	μm
4	Soğuk Kol Genişliği	16	nm
5	Eğilme bölgesi Uzunluğu	40	μm
6	Eğilme Bölgesi Genişliği	2	μm
7	Sıcak- Soğuk Kol arası mesafe	2	μm
8	Aktüatörün Kalınlığı	2	μm
9	Çalışma Sıcaklığı	300	$^{\circ}\text{K}$
10	Boşluğun Alanı	16	μm^2
11	Elektrik Pedlerinden Uygulanan Potansiyel Fark	5	V



Şekil 2: Boşluk Tipleri, a) Kare boşluk, b) Daire geometrileri, c) Dikey dikdörtgen boşluk, d) Yatay dikdörtgen boşluk geometrileri

II.2. Çözüm Yöntemi

Sonlu Elemanlar Analizi Metoduyla modeller incelenerek bulgular elde edilmiştir. Simülasyon için MARC-Mentat programı kullanılmıştır. MARC özellikle doğrusal olmayan analizlerde yüksek doğruluk sağlayan bir sonlu elemanlar çözücüsüdür ve geniş malzeme modelleri, karmaşık temas koşulları ve termomekanik etkileşimleri hesaba katabilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. Mentat ise MARC çözücüsüne entegre bir ön- ve son işlemci arayüzüdür; modelleme, ağ

(mesh) oluşturma, sınır koşullarının tanımlanması ve sonuçların görselleştirilmesini kullanıcı dostu bir ortamda sağlar.

MARC-Mentat, MEMS uygulamalarında yaygın olarak karşılaşılan yüksek deformasyonlar, sıcaklık dağılımları ve çoklu fiziksel etkileşimlerin modellenmesi için uygun bir platform sunmaktadır. Bu çalışmada farklı boşluk geometrilerine sahip MEMS tabanlı elektrotermal mikroaktüatörlerin yapısal ve termal analizleri, MARC çözücüsünün sunduğu doğrusal olmayan ısı iletim ve termomekanik çözümleme yetenekleri sayesinde gerçekleştirilmiştir.

III. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Modelimiz hem statik hem ısı yük altındadır. Tablo 2’de modelimize uygulanan karakteristik özellikler gösterilmiştir. Modelimize $x=0$ doğrultusu ve $y=0$ doğrultusunda elektrik pedleri bölümünden bağlanmıştır. Ayrıca yine elektrik pedleri bölümünden ısı işlem uygulanmaktadır.

Tablo 2: Modelin karakteristik özellikleri

No	Parametre	Değer	Birim
1	Elastik Modül	158000	N/mm^2
2	Poisson Oranı	0.23	
3	Sıcaklık Genleşme Katsayısı	3×10^{-6}	
4	Sıcaklık İletkenlik Katsayısı	1.4×10^8	$\text{pW}/\mu\text{m}$
5	Elektrik İletkenlik Öz direnci	2.3×10^{-11}	$\text{T}\Omega \cdot \mu\text{m}$

127 numaralı element tipi seçilmiştir. 2174 node sayısı ise 2174 olmuştur. 127 nolu element tipi ikinci dereceden izoparametrik üç boyutlu tetrahedrondur. Her kenar bir parabol oluşturur ve böylece dört düğüm, elemanın köşelerini tanımlar ve bir diğer altı düğüm, her bir kenarın “orta noktası” konumunu tanımlar. Bu, elastik analizlerde gerilme alanının doğru bir şekilde temsil edilmesine izin verir. Bu elementin kütle matrisi on altı nokta Gauss entegrasyonu kullanılarak oluşturulmuştur [16]. Simülasyonda incelenen skalalar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Simülasyonda incelenen skalalar

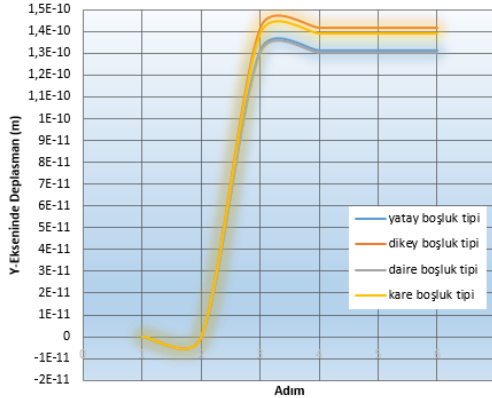
No	Parametre
1	X- ekseninde deplasman
2	Y- ekseninde deplasman
3	Sıcaklık Dağılımı
4	Reaksiyon Kuvvetleri
5	Isı Akısı Reaksiyonu

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

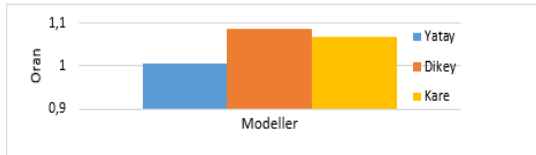
İncelemiş olduğumuz aktüatör modellerimizin hepsinde aktüatör üzerinde herhangi bir noktada sıcaklık değişikliği

olmadığı, 300°K çalışma sıcaklığında olduğu gözlemlenmemiştir.

Tüm modellerimizin sıcak kol tarafındaki uç noktalar seçilmiştir. Seçilen noktalarda oluşan y- eksenindeki deplasman değerleri ile Şekil 3' deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 3: Y-ekseninde oluşan deplasman grafiği



Şekil 4: Y- ekseninde oluşan deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Tüm modellerimizin sıcak kol tarafındaki uç noktalar seçilmiştir. Seçilen noktalarda oluşan y- eksenindeki deplasman değerleri ile Şekil 1'deki grafik elde edilmiştir. Şekil 2'de en az deplasmana sahip daire modelindeki deplasman değeri 1 birim olarak ele alındığında ortaya çıkan grafik verilmiştir. Dikey dikdörtgen boşluk tipine sahip aktüatör model daha önce kullanılan [11] kare boşluk geometrisine sahip modele göre %1,9 daha fazla deplasmana uğramıştır.

Y- ekseninde en fazla deplasmana uğrayan modelimiz, dikey dikdörtgen boşluk tipine sahip olan aktüatör olmuştur. X- ekseninde en fazla deplasmana uğrayan model ise kare boşluk tipine sahip model olmuştur. Modellerimiz üzerinde herhangi bir ısı birikimi meydana gelmediğini görülmüştür. Dikey dikdörtgen boşluk tipine sahip elektro-termal mikro aktüatör modelinin daha fazla deplasmana maruz kaldığından daha verimli olacağı düşünülmüştür.

Şekil 3 ve Şekil 4'e göre Y-eksenindeki deplasman bulguları yorumlanmış olup Y-ekseninde en yüksek deplasman değerine ulaşan model, dikey dikdörtgen boşluk tipine sahip yapı olmuştur. Bu modeli sırasıyla kare boşluk, yatay dikdörtgen boşluk ve dairesel boşluk tipine sahip modeller takip etmektedir. Daire tipi boşluk modelinin elde ettiği deplasman değeri referans (1 birim) olarak alındığında, dikey dikdörtgen boşluk tipi model yaklaşık %9 oranında daha fazla deplasman üretmiştir. Kare boşluk tipi model %7–8 aralığında, yatay dikdörtgen boşluk tipi ise yaklaşık %3 oranında daha fazla deplasman göstermiştir. Bu sonuçlar boşluk geometrisinin aktüatör performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Deplasman değerleri nano mertebesinde (10^{-10} m civarı) gerçekleşmiştir. Model tipine bağlı deplasman bulgularının değerlendirilmesi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Model tipine bağlı deplasman bulgularının değerlendirilmesi

Model Tipi	Y-Eksen Deplasmanı (görelî)	Yorum
Dikey Boşluk	~1,09	En yüksek, en verimli
Kare Boşluk	~1,07	Yaygın kullanılan, ancak dikeyden düşük
Yatay Boşluk	~1,03	Daha az etkili
Daire Boşluk	1 (referans)	En az deplasman, en düşük verim

Şekil 4 farklı geometrilerin deplasman verimliliğini oransal olarak kıyaslamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada dairesel boşluk geometrisine sahip model referans olarak 1 birim kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dikey ve kare boşluk geometrisine sahip modeller görelî olarak daha yüksek mekanik deplasman üretmiş ve daha verimli bir hareket sağlamıştır. Dikey boşluk tipi kare modele kıyasla yaklaşık %1,9 oranında daha fazla deplasman elde etmiştir. Bu durum boşluk geometrisinin aktüatör performansı üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile gerçekleştirilen simülasyonlar, boşluk geometrisinin aktüatörün mekanik performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle dikey boşluk geometrisinin, yüksek deformasyon kapasitesi ile birlikte ısı kararlılığı da koruyabilmesi, bu geometriyi yeni tasarımlar için öne çıkan bir aday haline getirmektedir. Bu doğrultuda dikey boşluk yapısının gelecekteki mikroaktüatör tasarımlarında tercih edilmesi önerilmektedir.

V. SONUÇ

[11] numaralı kaynakta önerilen kare boşluk geometrisiyle karşılaştırıldığında bu çalışmada önerilen dikey dikdörtgen boşluk tipine sahip modelin daha yüksek performans sergilediği görülmüştür. Bu sonuç geleneksel tasarım yaklaşımlarının gözden geçirilmesi ve geometriye dayalı optimizasyonun önemini ortaya koymaktadır.

MEMS tabanlı mikroaktüatörlerin tasarımında sadece malzeme seçimi ve boyutsal parametreler değil aynı zamanda boşluk geometrisi de kritik bir rol oynamaktadır. Dikey dikdörtgen boşluk geometrisine sahip yapı;

Daha fazla deplasman sağlayarak yüksek verimlilik sunmakta, ısı kararlılığını koruyarak güvenli çalışma imkânı tanımakta, Geometri bazlı optimizasyon sayesinde daha kompakt bir tasarım olanağı sağlamaktadır.

Bu bulgular özellikle hassas pozisyonlama sistemleri, mikrovalfler ve optik hizalama cihazları gibi MEMS uygulamaları açısından önemli tasarım önerileri sunmaktadır. Bu çalışmada dört farklı boşluk geometrisine sahip MEMS termal aktüatör modeli FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) ile analiz edilmiş ve yapısal tepki performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler boşluk geometrisinin mikroaktüatör performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendiren güvenilir ve uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır. Dikey boşluk tipinin sağladığı üstünlük gelecekteki MEMS aktüatör tasarımlarında mutlaka dikkate alınmalıdır.

V. KAYNAKLAR

- [1] Park, J.S.; Chu, L.L.; Oliver, A.D.; Gianchandani, Y.B. (2001). "Bent-beam electrothermal actuators-Part II: Linear and rotary microengines"
- [2] Maloney, J.M.; Schreiber, D.S.; DeVoe, D.L. (2004). "Large-force electrothermal linear micromotors"
- [3] Le, H. G., Ho, N. L., & Dao, T. P. (2025). Design synthesis, modeling, control strategies, and fabrication methods of compliant grippers for micromanipulation and

- micromanipulator: A comprehensive review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 92, 102893.
- [4] Zhuang, S., Lin, X., Yu, X., Zhao, Z., Liu, F., Boccaletti, S., & Gao, H. (2024). The Physics of micro-and nano-manipulation: Fundamentals and applications. *Physics Reports*, 1090, 1-70.
- [5] Chen, Y., & Xu, Q. (2025). Design and fabrication of a magnetic actuation miniature soft robot for biological sampling. In *Recent Progress in Medical Miniature Robots* (pp. 117-149). Academic Press.
- [6] Wilhelm, E., Richter, C., & Rapp, B. E. (2018). Phase change materials in microactuators: Basics, applications and perspectives. *Sensors and Actuators A: Physical*, 271, 303-347.
- [7] Kohl, M., Ament, C., Arivanandhan, G., Bechtold, T., Conrad, P., Croce, S., ... & Wulfinghoff, S. (2025). Active bi-and multistability in cooperative microactuator systems. *Sensors and Actuators Reports*, 100338.
- [8] Luo, X., Yang, L., & Cui, Y. (2023). Micropumps: Mechanisms, fabrication, and biomedical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 363, 114732.
- [9] Pennarun, P., Rossi, C., Estève, D., & Colin, R. D. (2007). Single use, robust, MEMS based electro-thermal microswitches for redundancy and system reconfiguration. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 273-281.
- [10] Brnas, D.M.; Bright, V.M. Design and performance of a double hot arm polysilicon thermal actuator. *Proc. SPIE* 1997, 3224, 296–306.
- [11] Comtois, J. H. and Bright V. M., “Applications for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and arrays”, *Sensors and Actuators*, vol. 58, pp. 19-25, 1997.
- [12] Comtois, J. H., Michalick, M. A., and Barron, C. C., “Characterization of electrothermal actuators and arrays fabricated in a four-level, planarized surface-micromachined polycrystalline Silicon Process”, *IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, pp. 16-19, June, 1997.
- [14] S.C. Huang, W.L. Chen, Design of topologically optimal microgripper, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2008, pp. 1694–1698.
- [15] van den Broek, D. M., & Elwenspoek, M. (2009). Effect of cavity pressure on the performance of the explosive micro-bubble actuator. *Microelectronic engineering*, 86(4-6), 1271-1273. Marc® 2010 Volume B: Element Library



**İstanbul
Bilgi University**

